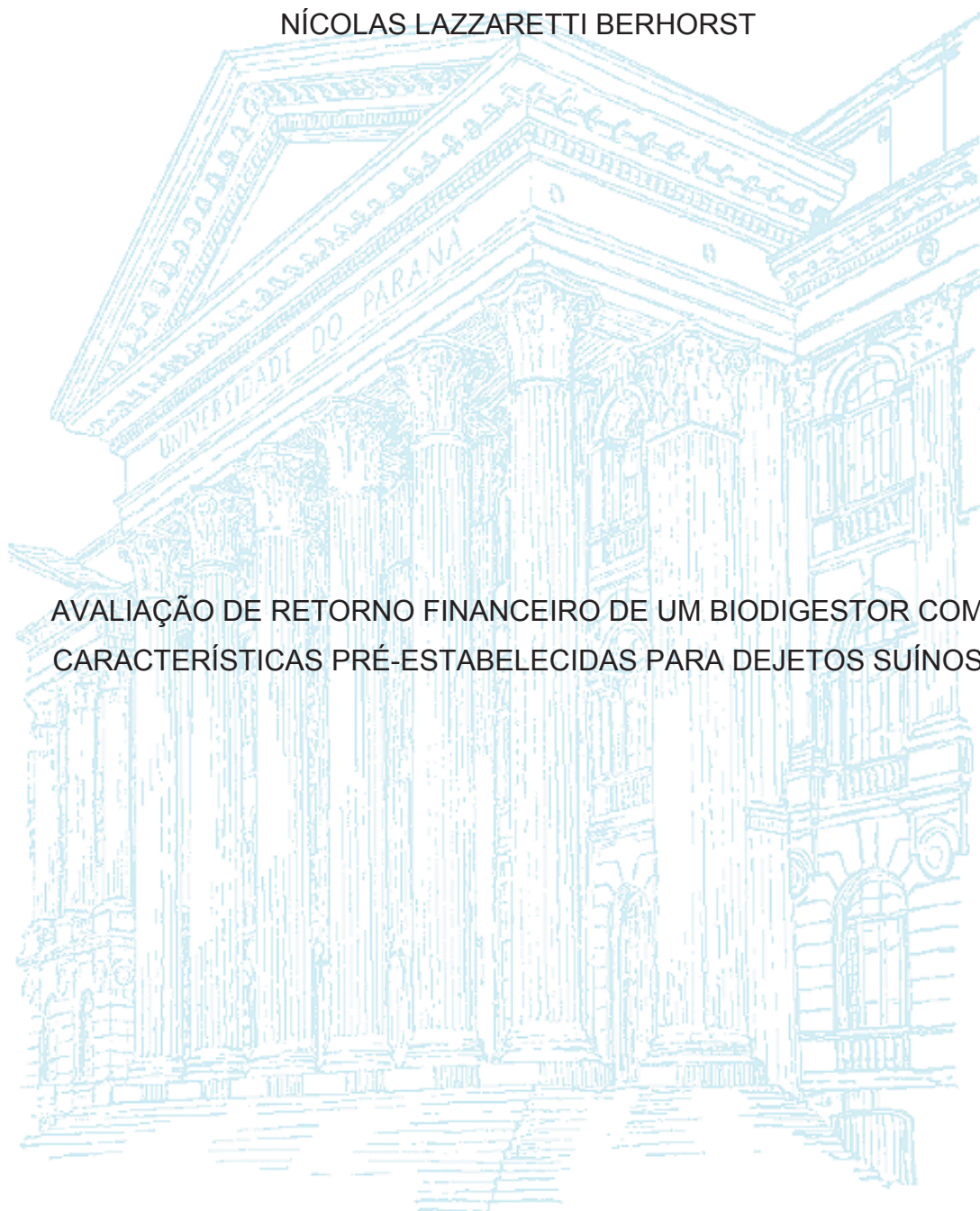


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NÍCOLAS LAZZARETTI BERHORST



AVALIAÇÃO DE RETORNO FINANCEIRO DE UM BIODIGESTOR COM  
CARACTERÍSTICAS PRÉ-ESTABELECIDAS PARA DEJETOS SUÍNOS

CURITIBA

2018

NÍCOLAS LAZZARETTI BERHORST

AVALIAÇÃO DE RETORNO FINANCEIRO DE UM BIODIGESTOR COM  
CARACTERÍSTICAS PRÉ-ESTABELECIDAS PARA DEJETOS SUÍNOS

Dissertação apresentada como requisito parcial ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de concentração em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná para obtenção do título de mestre em cotutela com a *Universität Stuttgart*, Alemanha e SENAI-PR.

Orientador: Prof. Dr. Andreas Grauer  
Coorientadora: Profa. Dra. Daniela Neuffer  
Coorientador: Prof. Dr. Arno Paulo Schmitz

Dissertation presented to the Institute of Technology of the University of Universidade Federal do Paraná in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master, in the area of Air Quality Control, Solid Waste and Waste Water Engineering.

Orientador: Prof. Dr. Andreas Grauer  
Coorientadora: Profa. Dra. Daniela Neuffer  
Coorientador: Prof. Dr. Arno Paulo Schmitz

CURITIBA

2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

B497a

Berhorst , Nicolas Lazzaretti

Avaliação de retorno financeiro de um biodigestor com características pré-estabelecidas para dejetos suínos / Nicolas Lazzaretti Berhorst . – Curitiba : UFPR : SENAI-PR : Stuttgart : Universidade de Stuttgart, Alemanha, 2018.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, 2018.

Orientador: Andreas Grauer – Coorientador: Daniela Neuffer. -  
Coorientador: Arno Paulo Schmitz.

1. Biogás. 2. Resíduos de animais. 3. Biodigestores. . I. Universidade Federal do Paraná. II. Grauer, Andreas. III. Título.

CDD: 665.776

Bibliotecária: Vanusa Maciel - CRB - 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MEIO AMBIENTE  
URBANO E INDUSTRIAL

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **NICOLAS LAZZARETTI BERHORST** intitulada: **AValiação DO RETORNO FINANCEIRO DE UM BIODIGESTOR COM CARACTERÍSTICAS PRÉ-ESTABELECIDAS PARA DEJETOS SUÍNOS**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.


A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 31 de Julho de 2018.




ANDREAS FRIEDRICH GRAUER

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)



GILSON MARTINS

Avaliador Externo (UFPR)



LUIZ ANTONIO CORREA LUCCHESI

Avaliador Externo (OSU)

Dedico este trabalho ao *Ivan Gilioli (Vento Sul Energia)*, *Paulo Yazbec (InnoVent)* e ao *Monroe Olsen (Próbiogás)*. São pessoas extraordinárias, que ajudaram a colocar minhas ideias em ordem e a trilhar o caminho que sigo com o objetivo de trabalhar com geração de energia elétrica renovável.

Ao *Geraldo Linck (Brasuma)*, *CIBiogás*, *Maicon Stuani* e *Pedro Köhler (BioKöhler Ltda.)* pelo suporte com dados, hospitalidade, sinceridade e por terem sido tão gentis e pacientes ao me levarem para visitas técnicas em diversos biodigestores no Oeste do Paraná.

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos à *Universidade Federal do Paraná (UFPR)* e ao *Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial (PPGMAUI)* que me educaram imensamente e me abriram muitas portas.

Tenho muita gratidão às professoras e aos professores que contribuíram na confecção e avaliação deste trabalho. Por parte deles não faltaram boas idéias, dedicação, excelentes sugestões e motivação para ir sempre mais longe.

Um efusivo agradecimento à *Universität Stuttgart*, ao *Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD)* e novamente ao *PPGMAUI* pela realização de um antigo grande sonho: o de estudar na Alemanha em uma universidade de ponta, viver no dormitório do campus e com uma bolsa de estudos.

Muito, muito obrigado, minha família e amigos, por enfrentarem junto comigo o desafio de concluir este curso e, principalmente, por serem tão interessados em me ouvirem discorrer sobre aproveitamento energético de resíduos suínos!

## RESUMO

Os resíduos da suinocultura podem ser usados na produção de energia renovável através do biogás após o tratamento apropriado dos efluentes para a produção de biofertilizante. Contudo, no Brasil, terceiro maior produtor de suínos do mundo, este recurso é normalmente desperdiçado. Este trabalho buscou identificar as circunstâncias necessárias para garantir um aproveitamento economicamente rentável dos resíduos da indústria suinícola. As condições ótimas do processo de digestão anaeróbica foram identificadas e utilizadas para estimativa da produção de biogás. O presente estudo foi feito a partir de um orçamento real de uma empresa especializada em construção de biodigestores. Foram projetados fluxos de caixa para quatro cenários de diferentes dimensões: 20, 30, 40 e 50 t/d de resíduos suínos (mistura de fezes e urina). O método utilizado conta com os indicadores Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL), *Payback* (PB) e Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE). Se evidencia a importância de um tanque de fermentação semiesférico e da instalação de equipamentos que possibilitem o controle de abastecimento do reator, manutenção da temperatura e homogeneidade do substrato. Dentre os resultados se destacam; o aproveitamento de 81% do potencial de produção de gás metano, o retorno financeiro de 87% ou R\$ 570.000 em 5 anos para o cenário com produção de resíduos de 50 t/d e o LCOE médio entre os cenários de 0,18 R\$/kWh, assim como a rentabilidade satisfatória para o investidor em 5 e 10 anos a partir de, respectivamente, 31 e 25 t/d. Com este trabalho se produziu uma planilha de cálculo configurável para uso de investidores e operadores. Ela calcula a rentabilidade e viabilidade de projetos de biodigestão de resíduos suínos de diferentes portes. Os resultados do estudo mostram que o tratamento anaeróbico é uma alternativa efetiva e que o projeto orçado é interessante para produtores de 4.800 a 9.800 animais - porte compatível com 20% da indústria brasileira e paranaense.

Palavras-chave: Biogás. Geração de energia descentralizada. Comparação Brasil e Alemanha.

## ABSTRACT

The residues from pig breeding can be used to produce renewable energy in the form of biogas, proper waste treatment and organic fertilizer production. However, in Brazil, the world's third largest pig producer, this resource is generally not used. The aim of this work was to identify the conditions necessary to ensure the economic use of the residues occurring in the pig industry. Optimized process conditions for the anaerobic treatment of residues from pig breeding were identified and used to estimate biogas production. The present study was prepared based on a real offer of a company specializing in biogas plants. Cash flows for four scenarios of different sizes were generated: 20, 30, 40 and 50 t/d of animal waste production. The method used is based on the indicators Internal Rate of Return (TIR), Net Present Value (VPL), Payback (PB) and Levelized Cost of Electricity (LCOE). The importance of a hemispherical reactor for anaerobic treatment and the installation of measuring instruments to control the reactor inlet by maintaining a constant temperature and homogeneity of the substrate have been demonstrated. Among the results, the following values are to be highlighted: the exploitation of 81% of the potential methane production, the financial return of 87% or R\$ 570,000 in 5 years for the scenario with 50 t/d waste production and the average LCOE under the scenarios with R\$ 0.18/kWh as well as a satisfactory return for the investor in 5 and 10 years, respectively with 31 and 25 t/d. With this work a configurable spreadsheet was created which is to be used by investors and operators. The profitability of fermentation plants for different quantities of residues from the pig industry is thus calculated. The result of the work shows that biological anaerobic treatment is an effective alternative and that the budgeted project is interesting for farms with 4,800 to 9,800 animals. This corresponds to a number of producers that represents 20% of the pig industry in Brazil and also in the state of Paraná.

Keywords: Biogas. Decentralized energy generation. Comparison Brazil and Germany.



## ZUSAMMENFASSUNG

Die anfallenden Reststoffe aus der Schweinezucht können für die Erzeugung von erneuerbarer Energie in Form von Biogas und eine Bio-Düngerproduktion herangezogen werden. In Brasilien, dem drittgrößten Schweineproduzenten der Welt, wird diese Ressource jedoch in der Regel nicht genutzt. Ziel dieser Arbeit war es, die notwendigen Voraussetzungen zu identifizieren, um eine wirtschaftliche Nutzung der in der Schweineindustrie auftretenden Reststoffe zu gewährleisten. Optimierte Prozessbedingungen zur anaeroben Behandlung von Reststoffen aus der Schweinezucht wurden identifiziert und zur Abschätzung der Biogasproduktion herangezogen. Die vorliegende Studie wurde auf der Basis eines realen Angebotes eines für Biogasanlagen spezialisierten Unternehmens erstellt. Für vier Szenarien mit einer Gülleproduktion von 20, 30, 40 und 50 t/d wurden Cashflowsberechnungen durchgeführt. Die verwendete Methode stützt sich auf die Indikatoren, Interne Rendite (TIR), Nettogegenwartswert (VPL), Payback (PB) und Nivellierte Stromkosten (LCOE). Es konnte bewiesen werden, wie wichtig ein halbkugelförmiger Reaktor zur anaeroben Behandlung sowie die Installation von Messgeräten ist, welche die Kontrolle des Reaktorzulaufs durch die Einhaltung einer konstanten Temperatur und die Homogenität des Substrats ermöglichen. Bei den Ergebnissen sind folgende Werte hervorzuheben, die Erschließung von 81% der potenziellen Methanproduktion, die finanzielle Rendite von 87% bzw. R\$ 570.000 in 5 Jahren für das Szenario mit 50 t/d Abfallproduktion und die durchschnittliche LCOE unter den Szenarien mit 0,18 R\$/kWh sowie eine zufriedenstellende Rendite für den Investor in 5 und 10 Jahren, jeweils mit 31 und 25 t/d. Mit dieser Arbeit wurde eine konfigurierbare Tabellenkalkulation erstellt, die bei Investoren und Betreibern zum Einsatz kommt. Die Rentabilität von Vergärungsanlagen für unterschiedliche Mengen an Reststoffen aus der Schweineindustrie wird damit berechnet. Das Ergebnis der Arbeit zeigt, dass die biologische anaerobe Behandlung eine effektive Alternative darstellt und dass das budgetierte Projekt für Betriebe mit 4.800 bis 9.800 Tieren interessant ist. Dies entspricht einer Anzahl von Produzenten, die 20% der Schweineindustrie in Brasilien und auch im Bundesstaat Paraná repräsentieren.

Schlüsselwörter: Biogas. Dezentralisierte Energieerzeugung. Vergleich Brasilien und Deutschland.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1: GRÁFICO DE CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIA PRIMÁRIA 1991-2016.....   | 22 |
| FIGURA 2: PASSOS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBICA.....  | 26 |
| FIGURA 3: GRÁFICO DO EFEITO DA TEMPERATURA NA DIGESTÃO ANAERÓBICA.....  | 28 |
| FIGURA 4: PRODUÇÃO ACUMULADA DE BIOGÁS E METANO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E TEMPO DE RETENÇÃO.....                 | 30 |
| FIGURA 5: FLUXO DE PROCESSOS DE UM BIODIGESTOR OTIMIZADO.....   | 37 |
| FIGURA 6: FOTOGRAFIA AÉREA DAS INSTALAÇÕES DE UM BIODIGESTOR OTIMIZADO.....                                       | 38 |
| FIGURA 7: CONSUMO MUNDIAL DE CARNES EM 2016 E 2017.....   | 39 |
| FIGURA 8: GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASIL E ALEMANHA EM 2016.....                                 | 42 |
| FIGURA 9: DIAGRAMA DO BALANÇO ENERGÉTICO DO BRASIL EM 2015.....   | 45 |
| FIGURA 10: DIAGRAMA DO BALANÇO ENERGÉTICO DA ALEMANHA EM 2015.....  | 46 |
| FIGURA 11: GRÁFICO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DA ALEMANHA E DO BRASIL.....   | 49 |
| FIGURA 12: GRÁFICO DO INTERVALO DE TEMPO PARA AMORTIZAÇÃO ENERGÉTICA POR TIPO DE USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA..... | 50 |
| FIGURA 13: FERRAMENTA DO EXCEL – GOAL SEEK.....   | 75 |
| FIGURA 14: GRÁFICO DO LCOE PARA DIFERENTES FONTES DE ENERGIA....  | 86 |
| FIGURA 15: SIMULAÇÃO DA TAXA INTERNA DE RETORNO DOS CENÁRIOS...89   |    |
| FIGURA 16: SIMULAÇÃO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO DOS CENÁRIOS.....  | 90 |
| FIGURA 17: ABA 1 – INSTRUÇÕES DA PLANILHA AVALIADORA DE RENTABILIDADE.....  | 93 |
| FIGURA 18: ABA 2-A – ÁREA DE INPUT DA PLANILHA AVALIADORA DE RENTABILIDADE.....                                   | 94 |
| FIGURA 19: ABA 2-B – ÁREA DE OUTPUT DA PLANILHA AVALIADORA DE RENTABILIDADE.....                                  | 94 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1: CAPEX .....   | 69 |
| TABELA 2: RESULTADOS CONVERSÃO ENERGÉTICA .....                                 | 82 |
| TABELA 3: MARGEM DE LUCRO ANO 2 .....   | 84 |
| TABELA 4: RESULTADO DOS 4 CENÁRIOS E 2 SIMULAÇÕES.....                          | 87 |
| TABELA 5: DISTRIBUIÇÃO DAS GRANJAS POR PORTE NO BRASIL .....                    | 91 |
| TABELA 6: DISTRIBUIÇÃO DAS GRANJAS POR PORTE NOS ESTADOS DA<br>REGIÃO SUL ..... | 92 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| QUADRO 1: PARÂMETROS SUGERIDOS PARA DESEMPENHO ÓTIMO DA<br>DIGESTÃO ANAERÓBICA DE RESÍDUOS SUÍNOS ..... | 33 |
| QUADRO 2: PRODUÇÃO DE BIOGÁS POR DIGESTÃO DE SÓLIDOS VOLÁTEIS<br>.....                                  | 34 |
| QUADRO 3: SÍNTESE DA COMPARAÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO ENTRE<br>BRASIL E ALEMANHA .....                    | 53 |
| QUADRO 4: ESPECIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS .....  | 55 |
| QUADRO 5: PARÂMETROS PARA CÁLCULO DO BIOGÁS POTENCIAL.....  | 59 |
| QUADRO 6: PARÂMETROS PARA CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO<br>.....                                  | 61 |
| QUADRO 7: VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DE GERAÇÃO DIÁRIA DE ENERGIA<br>ELÉTRICA E TÉRMICA .....             | 64 |
| QUADRO 8: DESPESA OPERACIONAL COM MÃO-DE-OBRA .....   | 70 |
| QUADRO 9: MANUTENÇÃO, SEGURO E CASUALIDADES .....   | 70 |
| QUADRO 10: FINANCIAMENTO .....  | 71 |
| QUADRO 11: VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS .....                                       | 77 |
| QUADRO 12: RESULTADO DO VOLUME DE PRODUÇÃO ÓTIMA DE METANO .  | 78 |
| QUADRO 13: COMPARAÇÃO PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM AJUSTE DAS<br>CONDIÇÕES DO REATOR .....                    | 79 |
| QUADRO 14: VOLUME PRODUZIDO DE BIOFERTILIZANTE POR CENÁRIO .....  | 80 |
| QUADRO 15: POTENCIAL DE EMISSÃO DE CERTIFICADO DE REDUÇÃO DE<br>EMISSIONES POR CENÁRIO .....            | 81 |
| QUADRO 16: CUSTOS E DESPESAS NO ANO 2 .....   | 83 |
| QUADRO 17: CÁLCULO DO LCOE PARA OS CENÁRIOS .....   | 85 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                   |  |
|-------------------|--|
| a.a.              | ao ano   |
| ANEEL             | Agência Nacional de Energia Elétrica   |
| BB                | Banco do Brasil  |
| BP                | <i>British Petroleum</i>   |
| C1                | Cenário 1  |
| C2                | Cenário 2  |
| C3                | Cenário 3  |
| C4                | Cenário 4  |
| CC                | Ciclo Completo   |
| CHP               | <i>Combined Heat and Power</i> – Central de calor e energia                                |
| CO <sub>2</sub>   | Dióxido de Carbono   |
| CO <sub>2</sub> e | Dióxido de Carbono equivalente   |
| COPOM             | Comitê de Política Monetária   |
| CSP               | <i>Concentrated Solar Power</i> – Energia solar concentrada                                |
| CRE               | Certificado de Redução de Emissões   |
| DA                | Digestão Anaeróbica  |
| DM                | <i>Dry Matter</i> – Matéria orgânica   |
| EQ                | Número da equação  |
| EXCEL             | <i>Microsoft Office Excel</i>  |
| GHG               | <i>Green House Gas</i> – Gás de efeito estufa  |
| ICMS              | Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços   |
| ITAIPU            | Usina Hidroelétrica Itaipu Binacional  |
| LCOE              | <i>Levelized Cost of Electricity</i> - Custo Nivelado de Eletricidade                      |
| m                 | mês / meses  |
| m <sup>3</sup>    | metro cúbico   |
| MDO               | mão-de-obra  |
| Mtoe              | <i>Million tonnes of oil equivalent</i> – Equivalente a um milhão de toneladas de petróleo |
| NH <sub>3</sub>   | Gás amoníaco   |
| NH <sub>4</sub>   | Amônia   |
| oDM               | <i>Organic Dry Matter</i> – Matéria orgânica seca  |
| ONU               | Organização das Nações Unidas  |

|       |   |
|-------|---|
| ORP   | <i>Oxygen reduction potential</i> – Potencial de redução de oxigênio                    |
| PB    | <i>Payback</i> – Tempo de retorno do investimento                                       |
| PIB   | Produto Interno Bruto   |
| RF    | Renda Fixa  |
| ROL   | Receita Operacional Líquida   |
| S10   | Simulação 10 Anos   |
| S5    | Simulação 5 Anos  |
| SELIC | Sistema Especial de Liquidação e Custódia (taxa básica de juros da economia brasileira) |
| SV    | Sólidos Voláteis  |
| TIR   | Taxa Interna de Retorno   |
| TMA   | Taxa Mínima de Atratividade   |
| TN    | Tesouro Nacional  |
| TR    | Tempo de Retenção   |
| TRH   | Tempo de Retenção Hidráulica  |
| UPD   | Unidade Produtora de Desmamados   |
| UPL   | Unidade Produtora de Leitão   |
| UT    | Unidade de Terminação   |
| VPAG  | Valor Potencial de Aquecimento Global   |
| VPL   | Valor Presente Líquido  |
| WTF   | <i>Wean to Finish</i> - Do desmame ao fim   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                  |   |                       |
|------------------|---|-----------------------|
| a                | - | ano(s)                |
| B                | - | Atividade Bacteriana  |
| CH <sub>4</sub>  | - | Gás Metano            |
| d                | - | dia                   |
| h                | - | hora(s)               |
| H <sub>2</sub>   | - | Hidrogênio            |
| H <sub>2</sub> S | - | Sulfeto de hidrogênio |
| T                | - | temperatura           |
| t                | - | tonelada              |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>18</b> |
| <b>2 OBJETIVOS .....</b>   | <b>20</b> |
| <b>3 REVISÃO LITERÁRIA .....</b>   | <b>21</b> |
| 3.1 INVESTIMENTO EM BIOGÁS - UMA ENERGIA RENOVÁVEL .....                     | 21        |
| 3.1.1 Digestão anaeróbica (DA) .....   | 25        |
| 3.1.2 Fatores para digestão anaeróbica otimizada .....                       | 27        |
| 3.1.3 Condições para desempenho ótimo do biodigestor .....                   | 32        |
| 3.2 BIOGÁS .....   | 34        |
| 3.3 DIMENSÃO DA INDÚSTRIA SUINÍCOLA MUNDIAL .....                            | 38        |
| 3.4 GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL .....                                       | 41        |
| 3.4.1 Matriz energética do Brasil e da Alemanha .....                        | 41        |
| 3.4.2 Amortização energética .....   | 49        |
| 3.4.3 Geração de energia distribuída .....                                   | 51        |
| <b>4 MÉTODOS .....</b>   | <b>54</b> |
| 4.1 ORÇAMENTO, CENÁRIOS E LIMITAÇÕES .....                                   | 54        |
| 4.2 VOLUME DIÁRIO DE PRODUÇÃO ÓTIMA DE BIOGÁS .....                          | 57        |
| 4.2.1 Produção potencial de metano .....                                     | 58        |
| 4.2.2 Ajuste de temperatura .....  | 60        |
| 4.2.3 Ajuste do tempo de retenção .....                                      | 61        |
| 4.2.4 Ajuste cinético da mistura .....                                       | 61        |
| 4.2.5 Conversão para comparação do resultado obtido com a literatura .....   | 63        |
| 4.2.6 Geração de energia da combustão do biogás .....                        | 63        |
| 4.2.7 Produção de biofertilizante .....                                      | 66        |
| 4.2.8 Produção de certificados de redução de emissões de carbono (CRE) ..... | 67        |
| 4.3 RETORNO ECONÔMICO-FINANCEIRO .....                                       | 67        |
| 4.3.1 Receita diária e anual .....   | 68        |
| 4.3.2 Depreciação .....  | 68        |
| 4.3.3 Operação .....   | 69        |
| 4.3.4 Manutenção, seguro e casualidades .....                                | 70        |
| 4.3.5 Financiamento .....  | 70        |
| 4.3.6 Lucro ou prejuízo .....  | 71        |
| 4.3.7 Valor presente líquido (VPL) .....                                     | 72        |



|  |            |
|--|------------|
| 4.3.8 Taxa interna de retorno (TIR) e taxa mínima de atratividade (TMA) .....  | 73         |
| 4.3.9 Tempo de retorno do investimento ou <i>Payback</i> .....                 | 73         |
| 4.3.10 Custo nivelado de eletricidade (LCOE) .....                             | 74         |
| 4.3.11 Simulações: mínimo de lodo para rentabilidade satisfatória.....         | 75         |
| 4.3.12 Planilha avaliadora de rentabilidade.....                               | 76         |
| 4.4 CONDIÇÕES TÍPICAS DE OPERAÇÃO DE UM BIODIGESTOR PARA<br>SUINOCULTURA ..... | 76         |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>  | <b>78</b>  |
| 5.1 VOLUME PRODUÇÃO ÓTIMA DE METANO .....                                      | 78         |
| 5.2 BIOFERTILIZANTE .....  | 80         |
| 5.3 CERTIFICADOS DE REDUÇÃO EMISSÕES DE CARBONO (CRE) .....                    | 81         |
| 5.4 CONVERSÃO ENERGÉTICA .....   | 82         |
| 5.5 FLUXO DE CAIXA.....  | 83         |
| 5.6 CUSTO NIVELADO DE ENERGIA (LCOE).....                                      | 84         |
| 5.7 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS CENÁRIOS.....                                    | 87         |
| 5.8 INVESTIMENTO POTENCIAL / PÚBLICO ALVO .....                                | 90         |
| 5.9 PLANILHA AVALIADORA DE RENTABILIDADE .....                                 | 92         |
| <b>6 CONCLUSÃO .....</b>   | <b>96</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>98</b>  |
| <b>APÊNDICE 1 - FLUXOS DE CAIXA E DA DÍVIDA BANCÁRIA .....</b>                 | <b>105</b> |
| <b>ANEXO 1 - ORÇAMENTOS.....</b>   | <b>109</b> |
| <b>ANEXO 2 - HISTÓRICO TAXA SELIC .....</b>                                    | <b>110</b> |
| <b>ANEXO 3 - FOTOS .....</b>   | <b>112</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O resíduo do metabolismo dos suínos é um poluente para solo, ar e principalmente para os rios. Seu tratamento e destinação adequados representam um grande desafio para produtores de todos os portes. Uma das opções é a utilização de reatores de digestão anaeróbica (DA), com os quais se possibilita tanto o tratamento biológico dos resíduos quanto a exploração econômica do potencial energético renovável do biogás e, adicionalmente, do nutritivo fertilizante formado (NEUFFER, 2004)

A DA se resume a uma ação coordenada e complexa de microrganismos que digerem e transformam a matéria orgânica em, essencialmente, metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Sua eficácia se subordina às condições propiciadas pelo reator, tais como ausência de oxigênio, temperatura, homogeneidade, tempo de retenção e abastecimento do substrato. Qualquer mudança nestes fatores pode diminuir consideravelmente a eficiência do tratamento e até mesmo levar à sua falha (AL SAEDI et al., 2008).

Um biodigestor de ótimo desempenho possui, portanto, os equipamentos necessários que garantem à técnica as condições ótimas de fermentação. Instrumentos, infraestrutura e capital de investimento compatíveis são, dessa forma, essenciais para o êxito técnico, ambiental e econômico do projeto.

Neste sentido, se entende como importante verificar quais os critérios necessários para otimização do processo de biodigestão e retorno financeiro satisfatório do investimento.

Para tanto, se estudou o processo de DA e identificou as condições necessárias para sua otimização. Em seguida, com base em um orçamento de um biodigestor para produtores de médio porte, com capacidade instalada de 75kW, que conta com os equipamentos demandados para a otimização da performance, foram calculados os indicadores de retorno financeiro para quatro cenários de diferentes quantidades de resíduos como 20, 30, 40 e  $50 \frac{t}{d}$  e se determinou o mínimo necessário para um retorno financeiro do investimento satisfatório em 5 e 10 anos.

Este estudo também produziu uma planilha de cálculo, configurável ao perfil do produtor, para uso de investidores interessados e proprietários de biodigestores.

Com ela é possível avaliar a viabilidade econômico-financeira do investimento em biodigestão nos períodos de 5 e 10 anos.

Este é um trabalho que busca esclarecer aspectos sobre a geração de energia renovável descentralizada no Brasil ao mostrar a potencial geração de caixa de um resíduo amplamente desperdiçado e subestimado. Ele descreve as circunstâncias técnicas necessárias que possibilitam transformar os volumosos dejetos de suínos em uma valiosa geração de eletricidade.

Se trata de um tema importante para a preservação do meio ambiente, diversificação do setor energético renovável e diminuição de custos da indústria suinícola. A motivação do estudo se respalda na dimensão da atividade e do seu potencial de geração de eletricidade e desenvolvimento na região do Sul do Brasil, especialmente do Paraná. Apesar de ser uma técnica antiga, eficiente e amplamente utilizada na Alemanha, por exemplo, grande parte dos produtores de suínos brasileiros não fazem uso dela.

A comparação entre técnicas e setor energético do Brasil e Alemanha é frequente neste trabalho, pois este é o país líder na técnica moderna de biodigestão mundial e referência em desenvolvimento de geração de energia renovável descentralizada.

Muitos dos biodigestores construídos no Brasil não possuem um funcionamento ótimo, pois foram construídos de forma modificada, com menos técnica, a fim de reduzir custos e facilitar sua construção e disseminação. Isso reforça o frequente rechaço da técnica por parte dos produtores, explicado pela reputação dos biodigestores como um investimento caro, ineficaz e deficitário (KUNZ; OLIVEIRA, 2006).

Com este estudo se espera divulgar o método apropriado de construção e operação de biodigestores e o retorno financeiro que ele propicia. Se espera encontrar um montante mínimo de resíduos não extraordinário entre pequenos e médios produtores, que possibilite uma rentabilidade satisfatória para o investidor em um período de no máximo 10 anos.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Fortalecer a opinião de que a biodigestão na suinocultura é um bom negócio, através de uma avaliação do retorno financeiro de um reator com características pré-estabelecidas para tratamento e aproveitamento energético de dejetos suínos através de modelagem econômica.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Sugere-se, para isso:

- i) estabelecer as características do reator
- ii) calcular através da modelagem econômica a eficiência de produção do metano para as condições ótimas encontradas no Sul do Brasil;
- iii) calcular indicadores de retorno financeiro do projeto orçado (valor presente líquido, taxa interna de retorno e payback) para quatro cenários de diferentes tamanhos de produtores;
- iv) simular a quantidade mínima de substrato para que o investimento se torne lucrativo em 5 e em 10 anos e qual a representatividade de granjas compatíveis na indústria nacional e paranaense;
- v) propor uma planilha de cálculo configurável, para uso de investidores e operadores, a fim de avaliar a exequibilidade econômica em 5 e em 10 anos de um projeto de investimento em biodigestão na suinocultura de diferentes portes.

### 3 REVISÃO LITERÁRIA

#### 3.1 INVESTIMENTO EM BIOGÁS - UMA ENERGIA RENOVÁVEL

A escassez de recursos é o tema que deu origem à ciência econômica. No contexto de ativos ambientais, este problema se refere à sua carência, dada a dimensão do consumo humano ao longo do tempo, bem como ao custo-oportunidade da exploração.

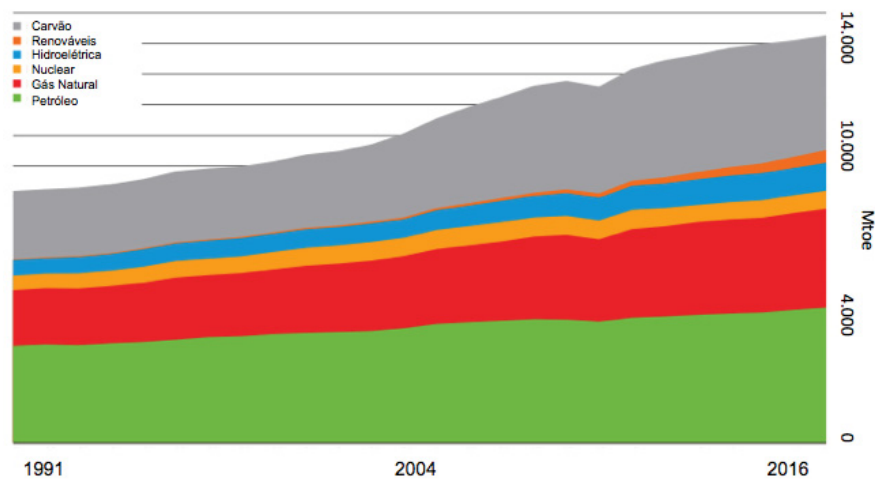
A geração de energia por combustível fóssil é de origem não-renovável com limite físico de exploração produz externalidades ambientais manifestadas em emissões atmosféricas, poluição do ar, resíduos particulados e alterações geográficas. Um relatório da Organização das Nações Unidas – ONU (1987), chamado *Our Common Future*, discorre sobre o relacionamento das nações para com um desafio comum: o futuro ameaçado pelo aumento da população, do consumo e da exiguidade dos ativos ambientais. Esta publicação pode ser considerada como o marco histórico da inserção do conceito de desenvolvimento sustentável nas discussões político-econômicas modernas (ONU, 1987).

Uma das atividades por este relatório, levada à prática após a divulgação em 1987, consiste na busca por geração de energia através de fontes renováveis. O relatório anual sobre o setor energético mundial da British Petroleum (BP), de 2017, registra um consumo de energia primária renovável em ordem de apenas 3,2% do total mundial. Se forem incluídas as fontes nuclear e hidroelétrica, o número passa para aproximadamente 15% (BP, 2017).

Mesmo que esses valores pareçam assustadoramente pequenos, sua evolução tem acelerado rapidamente nos últimos anos, tanto que a tendência de investimentos da indústria energética tem sido na direção do desenvolvimento técnico e execução de projetos de energia renovável (SULEWSKI, 2016).

A FIGURA 1 mostra o consumo mundial por fonte energética desde 1991 até 2016 e ilustra este movimento de aumento de investimento em geração de energias renováveis através da menor faixa do gráfico, a laranja escura, que representa o total de eletricidade gerado por estas fontes.

FIGURA 1: GRÁFICO DE CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIA PRIMÁRIA 1991-2016



FONTE: Adaptado de BP Statistical Review of World Energy 2017

Ao analisar a FIGURA 1, se pode notar que as fontes nucleares e hídricas não demonstram expressivo aumento de fatia de mercado nos últimos anos. Já as renováveis registraram evolução, em especial pela energia eólica e solar fotovoltaica, que aumentaram sua capacidade instalada em 533% e 5.132%, respectivamente, entre 2006 e 2016 (BP, 2017).

Apesar das fontes eólicas e solares serem uma fonte de energia sem despesas de aquisição de combustível para geração, uma vez que o vento e sol são oferecidos pela natureza, o custo de construção continua ainda muito dispendioso - mesmo com a constante queda de seu preço, pois requer uma expressiva aplicação de capital antes de gerar qualquer energia. No entanto, as despesas recorrentes se limitam à manutenção da operação. A geração de energia de fonte fóssil, ao contrário, possui uma constante e expressiva despesa com aquisição da matéria-prima e com tratamento dos resíduos ao longo de todo o período de operação da planta (HEAL, 2009).

Em comparação com energia gerada do carvão e derivados de petróleo, a energia renovável conta com custo muito mais elevado por kWh. Contudo, frente à tendência de apreciar o “valor” da energia e não apenas o “preço” das fontes renováveis tem caído continuamente, como o Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE) – preço pelo qual a energia deve ser vendida para pagar os a totalidade dos custos e despesas da planta até o fim de sua operação. Tal fato é explicado pelo

aumento de demanda e avanços técnicos, tais como o uso de materiais mais baratos, mais produtivos e em menor quantidade, processos produtivos automatizados e economia de escala (HEAL, 2009).

Para que o projeto de construção da unidade de geradora de energia seja executado os acionistas devem concordar com o retorno econômico-financeiro previsto no projeto. A aferição do resultado é feita com base em uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Esta taxa identifica o retorno considerado mínimo para o investidor aplicar seu capital. Para investidores públicos, esta taxa pode ser definida em 0%, com intuito de executar uma obra para o bem-estar dos contribuintes, sem fins lucrativos, mas sem registrar prejuízo (KRANERT, 2017).

No setor privado, os agentes econômicos tendem a buscar a maximização do lucro e definirão sua TMA ao responder a seguinte pergunta: qual o retorno mínimo desejado para aceitar o risco de aplicar capital neste projeto?

Portanto, um projeto de viabilidade financeira leva em conta, por um lado, os custos e despesas necessários para executá-lo e mantê-lo funcionando com ótima performance e, em uma segunda perspectiva, se estima a remuneração pelo produto ou serviço vendido ao longo do tempo. Através de índices financeiros como o Valor Presente Líquido (VPL), *Payback* e Taxa Interna de Retorno (TIR), o investidor poderá vislumbrar a rentabilidade estimada da empreitada. Se a TIR for maior ou igual a TMA escolhida no período determinado, o empreendedor inclina-se a seguir com os estudos de execução do projeto. A TMA é determinada pela soma dos seguintes fatores a) expectativa de inflação do período, b) do rendimento da aplicação do capital atual e c) de um prêmio sobre risco (FONSECA, 2012).

Usualmente se identifica progresso em execução de projetos de fontes renováveis de investimentos públicos subsidiados por governos de países interessados em evoluir no setor. Como exemplo, temos o governo federal da Alemanha, que apoia politicamente seu desenvolvimento, com o objetivo de reduzir emissões de gases de efeito estufa (GHG) entre 80-95% (base em 1990) até 2050 e, ainda, desativar todos os reatores nucleares em seu território até 2022. A execução de planos de incentivo como este traz crescimento próspero ao setor, abertura de mercado e competitividade em nichos nos quais a operação eficiente de técnicas de geração de energia renovável possa se tornar possível sem subsídios no futuro (FRAUNHOFER, 2013).

Apesar das vantagens de funcionar com recursos naturais e não prejudicar o ambiente com emissões na geração de eletricidade, as fontes de energia renovável são limitadas pela sensibilidade ao tempo (situação climática), por exemplo, incidência de ventos para as eólicas e radiação solar para as solares, e pela dificuldade de armazenamento da energia. Até que o acúmulo da energia gerada pelas renováveis seja menos custoso e mais viável e eficiente, haverá uma demanda latente por carvão, gás, petróleo e urânio como fonte segura de geração energética (HEAL, 2009).

Outro fator é o índice de densidade energética do empreendimento, que mede a capacidade de geração de energia por área ocupada. Em especial, para as hidroelétricas e biomassa, que ocupam uma vasta área para formar sua reserva de insumo, é imprescindível medir a interferência geográfica e externalidades no meio ambiente (SMIL, 2015).

De acordo com o *Biogas Handbook* (AL SEADI et al., 2008), uma alternativa livre destes fatores é a produção e aproveitamento energético do biogás oriundo de resíduos de animais na pecuária. É uma forma de energia renovável que traz os benefícios adicionais não encontrados nas outras fontes. Dentre estes, destacam-se:

- a conversão de um passivo ambiental em geração de receita adicional;
- redução da emissão atmosférica de CH<sub>4</sub> (gás metano), NH<sub>4</sub> (amônia) e compostos de nitrogênio e de enxofre;
- produção do insumo biofertilizante para lavoura e
- eliminação de odores e da proliferação de insetos.

Além do uso e descarte adequado deste resíduo conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos, o uso deste tipo de fertilizante organomineral aumenta a estrutura do solo ao adicionar matéria orgânica, do qual pode ser deficiente, e traz maior produtividade para as lavouras do setor (BNDES, 2017).

Ademais, o biogás é facilmente armazenável e pode gerar eletricidade e energia térmica 24 horas por dia, sem depender de condições climáticas e, ainda, em uma menor área dentro da unidade de produção.

Apresentando-se, portanto, como a solução ideal para unidades pecuárias com expressivo consumo de eletricidade e também para auxiliar o setor energético a cobrir a demanda elétrica em horários de pico, usualmente entre às 19 e 22 horas para (ANEEL, 2015).



O processo tecnológico dentro de uma planta de biogás consiste na decomposição da matéria orgânica por microrganismos anaeróbicos, que levam ao tratamento sanitário e à produção de biogás e, conseqüentemente, metano ( $\text{CH}_4$ ) – produto mais importante para viabilidade do sistema. O  $\text{CH}_4$  obtido neste processo pode ser usado para combustão, geração de energia elétrica e térmica ou aprimorado para os parâmetros de gás natural a fim de ser enriquecido, comprimido e utilizado no setor automobilístico (SULEWKSI et al., 2016).

Este trabalho abordará apenas a primeira opção, pois a demanda de investimento para aprimoramento e compressão do gás metano requer uma infraestrutura muito mais robusta do que a proposta deste estudo.

Portanto, é possível identificar o  $\text{CH}_4$ , como gerador de receita de uma planta geradora de energia limpa para produtores pecuários. Quanto mais  $\text{CH}_4$  for gerado com a matéria prima disponível, maior será a performance e a rentabilidade do capital aplicado.

Segundo (AL SEADI et al., 2008), o cumprimento do controle de temperatura, abastecimento e homogeneidade do lodo previnem a constante atividade bacteriana (B), que é fundamental para o funcionamento ótimo do biodigestor. A falha em uma das etapas da fermentação por variação brusca da temperatura ou do pH, por exemplo, pode levar à produção reduzida biogás diminuição da geração de eletricidade, excesso de despesas com manutenção e, conseqüentemente, ao prejuízo. Assim, é importante priorizar e otimizar a geração e combustão de  $\text{CH}_4$ , para que o funcionamento da planta cumpra com as expectativas do projeto de viabilidade econômico-financeira

### 3.1.1 Digestão anaeróbica (DA)

A digestão anaeróbica (DA) é uma estabilização bioquímica que transforma a matéria orgânica em biogás, destrói os agentes patogênicos presentes e limita possíveis problemas com odores e proliferação de insetos associados à decomposição (NEUFFER, 2004).

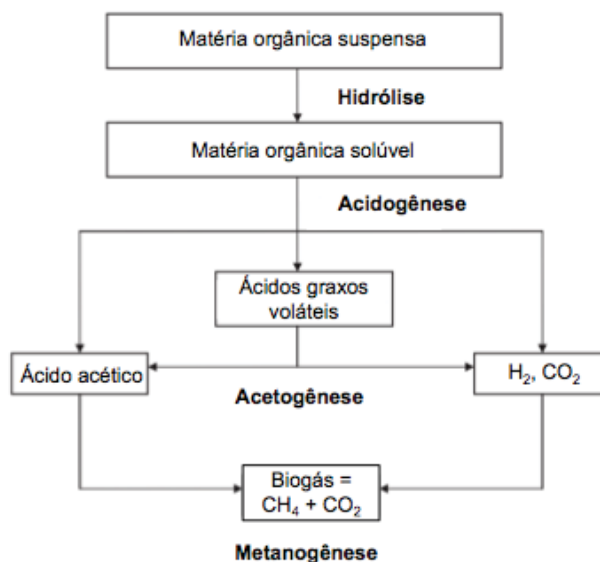
O efluente da atividade suinícola possui forte caráter contaminador e deve ser tratado para diminuir seu volume e reduzir os problemas associados à doenças e contaminação ambiental. O tratamento biológico diminui a quantidade de água e

sólidos do lodo, transforma a altamente putrificada matéria orgânica em um efluente estável.

A DA de matéria orgânica segue os seguintes passos: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. É um processo que requer rígidas condições anaeróbicas e depende da atividade coordenada entre associações de complexos microrganismos que convertem a matéria orgânica em principalmente  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ . A coordenação das etapas está ilustrada na FIGURA 2.

Inicialmente, a hidrólise degrada o material insolúvel e as grandes moléculas em substâncias orgânicas solúveis. Esta é considerada a etapa mais sensível à performance de produção de biogás. A acidogênese quebra as moléculas resultantes da hidrólise e termina com a formação de ácidos graxos voláteis, como gás amoníaco ( $\text{NH}_3$ ),  $\text{CO}_2$ , sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ) entre outros. A acetogênese digere os álcoois e ácidos orgânicos produzidos na etapa anterior e produz, principalmente, ácido acético,  $\text{CO}_2$  e gás hidrogênio ( $\text{H}_2$ ). Por fim, a metanogênese ataca com dois grupos diferentes de bactérias. Por um lado, o acetato é quebrado e forma  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ . Pelo outro lado, utiliza o  $\text{H}_2$  como doador de elétrons para o  $\text{CO}_2$  resultando, também, em  $\text{CH}_4$  (APPELS et al., 2008).

FIGURA 2: PASSOS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBICA



FONTE: Adaptado de (APPELS et al., 2008), (NEUFFER, 2004)

A interrupção ou alteração em qualquer das quatro fases descritas no item anterior pode diminuir o volume de biogás produzido ou até levar o processo à falha (APPELS et al., 2008).

### 3.1.2 Fatores para digestão anaeróbica otimizada

A rentabilidade de um biodigestor depende da quantidade de  $\text{CH}_4$  produzido. O reator que proporciona uma DA ideal terá eficiência na produção do gás e otimizará sua receita.

A eficiência da fermentação é influenciada por alguns parâmetros críticos que suportam a atividade dos microrganismos, tais como exclusão de oxigênio ( $\text{O}_2$ ), temperatura, pH, suprimento de substrato e grau de agitação constantes (AL SEADI et al., 2008). Os próximos itens detalharão estes parâmetros.

- Temperatura

A temperatura tem um importante efeito nas propriedades dos componentes da fermentação. Ela influencia a taxa de crescimento, metabolismo e dinâmica populacional dos microrganismos dentro do reator. A DA e geração de biogás otimizada ocorre na faixa de temperatura mesofílica, entre 30 e 42 °C. Já a operação em estado-de-arte (máxima eficácia) é na faixa termofílica, entre 50 e 60 °C (AL SEADI et al., 2008).

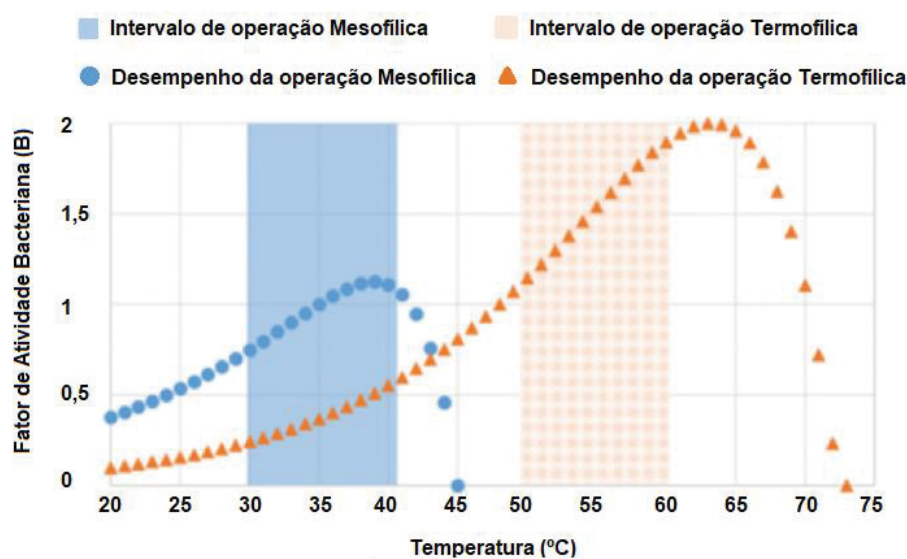
Trabalhar na faixa termofílica pode ser vantajoso, pois este maior grau de agitação das moléculas acelera a reação, aumenta a solubilidade dos compostos orgânicos, eleva a velocidade de eliminação de agentes patogênicos, diminui o tempo de retenção necessário para a reação completa e, portanto, requer um reator menor.

Entretanto, a fermentação neste intervalo de temperatura mais elevada tem maior potencial de odores, é mais frágil a falhas, consome mais energia térmica, conta com maior risco de inibição pelo  $\text{NH}_3$  instável. Além disso, demanda um maior custo de investimento e um rígido e constante controle da operação, dado que a variação de apenas 1 °C pode levar o processo à pane. Na faixa de temperatura mesofílica, sua eficácia suporta uma variação de até 3 °C (WU et al., 2016).

A concentração de  $\text{NH}_3$  é diretamente proporcional à temperatura. Este composto é comumente encontrado no lodo da pecuária por estar presente, em grande parte, na urina dos animais. Esta forma de amônia é considerada a responsável pela inibição do processo de formação de biogás e deve ser mantida em níveis menores a 80 mg/L. As bactérias metanogênicas são especialmente sensíveis e esterilizadas por este composto. Estes motivos fazem com que a operação na faixa de temperatura termofílica seja mais sensível (AL SEADI et al., 2008).

A FIGURA 3 demonstra a relação da atividade bacteriana e, conseqüentemente, o desempenho da DA e produção de biogás, em função das faixas de temperatura da reação.

FIGURA 3: GRÁFICO DO EFEITO DA TEMPERATURA NA DIGESTÃO ANAERÓBICA



FONTE: Adaptado de (WU et al. 2016).

A produção de resíduos dos suínos, alvo da biodigestão, se encontra normalmente na área rural, longe de laboratórios e da mão de obra especializada na cinética de reatores. Por isso, para sua viabilidade, é fundamental que biodigestor funcione com baixa demanda de mão de obra e cumpra com os requisitos ótimos da DA. O melhor dos cenários seria trabalhar com a técnica no estado-de-arte com a

faixa de temperatura termofílica, contudo, tais equipamentos e controles longe de laboratórios inviabilizariam o projeto (KEDIA, 2017).

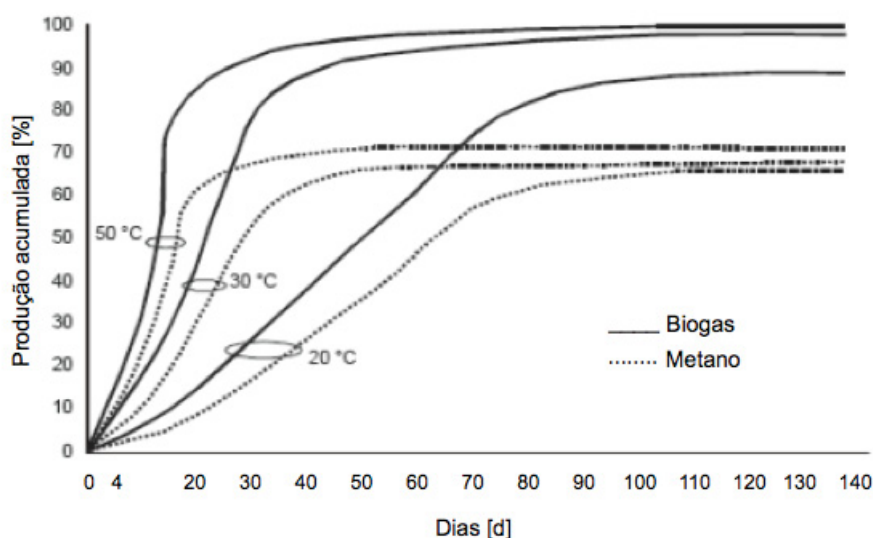
- Regime de Abastecimento, Valor-pH e Tempo de Retenção

O abastecimento do reator deve ser feito de forma contínua, a fim de equalizar a vazão à taxa de digestão, mantendo as condições ideais de fermentação, como pH, temperatura e homogeneidade constantes. O abastecimento de uma carga volumosa de lodo pode alterar rapidamente, por exemplo, a temperatura do substrato, inibir parcial ou totalmente as etapas da digestão, alterar o pH do lodo e, assim, diminuir o volume gerado de gás e até levar o processo à falha. O pH influencia o crescimento dos microrganismos metanogênicos e afeta a formação de moléculas importantes para o processo, como  $\text{NH}_3$ , sulfatos e ácidos orgânicos. Seu intervalo ideal para a faixa de temperatura mesofílica se mantém no intervalo de 6,5 a 8 (AL SEADI et al., 2008).

O cálculo do volume necessário disponível do tanque de DA deve, assim, levar em conta a vazão de entrada de lodo e o tempo de retenção hidráulica (TRH) necessário para os bacilos se alimentarem e destruírem os sólidos voláteis do substrato. Até certo nível, a correlação entre o tempo de retenção (TR) e a geração de biogás é positiva, e, muitas vezes é descrita em uma curva logarítmica (WU et al., 2016), como ilustrado na FIGURA 4.

Para biodigestores redondos, com controle de homogeneização, de temperatura na faixa mesofílica e que trabalham com substratos de lodo da pecuária, o TR indicado é de 30 a 40 dias. Se considera que quatro dias são necessários para o lodo começar a ser digerido, 10 dias para as bactérias começarem a se reproduzir (AL SEADI et al., 2008) e o restante para o cumprimento das quatro etapas de DA.

FIGURA 4: PRODUÇÃO ACUMULADA DE BIOGÁS E METANO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E TEMPO DE RETENÇÃO



FONTE: Adaptado de (WU et al., 2016).

A ilustração da produção de biogás e metano em função da temperatura e tempo de retenção é feita na FIGURA 4 por curvas em três distintas temperaturas; 20, 30 e 50 °C. Todas as curvas possuem em essência o mesmo movimento – expressiva inclinação no início do gráfico e constância a partir de certo ponto. É possível identificar que o grau de inclinação no início do eixo é diretamente proporcional ao grau de temperatura. Por outro lado, quanto maior a temperatura mais rápido a curva se mantém constante.

Isto é, quão maior a temperatura de operação, faixa termofílica ao invés da mesofílica, por exemplo, mais rápido ocorrerá a digestão da matéria orgânica e consequente estabilização química do resíduo. Isso possibilita mais rápido aproveitamento do metano e menor tempo de retenção hidráulica para o tratamento.

Segundo o gráfico, a 20 °C demora cerca de 80 dias para que a produção de biogás se estabeleça constante em 85% do potencial. A 30 °C se reduz pela metade e a 50 °C se faz necessário aguardar apenas cerca de 30 dias para a estabilização química e de produção de gás.

- Homogeneidade do lodo

A homogeneidade do lodo é um importante fator da performance do reator e influencia o grau de saneamento e eliminação dos agentes patogênicos. O design apropriado do tanque, controle de aquecimento, agitação e alimentação no digestor são imprescindíveis para alcançar o desempenho ótimo do tratamento (APPELS et al., 2008).

O biodigestor ótimo conta com tanques de formato semiesférico, a fim de aumentar o desempenho do agitador, evitar sedimentação do substrato e, consequentemente, despesas com manutenção (BRASUMA, 2017).

Segundo o *Biogas Handbook* (AL SEADI et al., 2008) um movimento natural do substrato acontece por fluxos de convecção térmica e pela formação das bolhas de biogás. Esta mistura passiva não é suficiente para o nível de homogeneidade desejado e operação saudável do digestor, logo, equipamentos específicos de agitação devem ser instalados, em ambos os reservatórios.

A implementação pode ser realizada por agitadores mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos. Na Europa, 90% das plantas de biogás utilizam misturadores mecânicos. Eles podem operar em baixa, média ou alta rotação, ser submersíveis, fixos no centro do tanque ou do tipo pá.

Os modelos hidráulicos e pneumáticos não são indicados para tratamento de lodo de animais, pois não são adequados para destruição de camadas sedimentadas e podem gerar muitas despesas com manutenção.

O conteúdo do digestor, no tanque fechado, deve ser agitado várias vezes ao dia com o objetivo de juntar o lodo antigo com o novo dentro do tanque. Além disso, a agitação:

- i) impede a sedimentação (formação de camadas rígidas comumente na superfície ou nas paredes do reator);
- ii) traz os microrganismos em contato com seu alimento - as partículas sólidas orgânicas do mais recente substrato;
- iii) facilita o avanço das bolhas de biogás e
- iv) homogeniza a distribuição de calor e de nutrientes por todo volume preenchido do tanque, o que diminui o risco de falhas no processo de fermentação.

Ainda segundo este manual publicado, o resíduo líquido do processo é rico em nutrientes para o solo (nitrogênio, potássio e fósforo) e pode ser usado como fertilizante. Para isso o tanque que o armazena deve ser agitado em frequência distinta ao tanque de digestão, a fim de evitar a volatilização da  $\text{NH}_4$  e consequente perda do nitrogênio. O grau de agitação do resíduo para fertilização deve ser baixo e, se possível, feito logo antes do transporte e aplicação no solo.

### 3.1.3 Condições para desempenho ótimo do biodigestor

No QUADRO 1 se encontram parâmetros comentados nos itens anteriores, que se entendem necessários para obter um tratamento biológico satisfatório do lodo e uma metodologia que possibilite resultados confiáveis.



QUADRO 1: PARÂMETROS SUGERIDOS PARA DESEMPENHO ÓTIMO DA DIGESTÃO ANAERÓBICA DE RESÍDUOS SUÍNOS

| Nome do parâmetro                          | Valor sugerido                      | Risco de não cumprimento  |
|--|-------------------------------------|---|
| Quantidade de oxigênio dentro do reator    | ORP < -200 mV                       | tratamento incompleto, menor produção de biogás   |
| Temperatura do lodo dentro do reator       | Faixa Mesofílica (entre 30 e 42 °C) | alteração do pH   |
| Variação máxima de temperatura             | 3°C                                 | falha do processo de DA   |
| Alimentação de lodo                        | Contínua                            | alteração de temperatura e pH   |
| Concentração máxima de NH <sub>3</sub>     | 80 mg/L                             | falha do processo de DA   |
| pH   | entre 6,5 e 8,0                     | alteração quantidade de NH <sub>3</sub>   |
| Tempo de retenção                          | entre 30 e 40 dias                  | tratamento incompleto, odores, agentes patogênicos, menor produção de biogás  |
| Formato do tanque                          | Esférico                            | sedimentação do substrato, menor homogeneidade  |
| Grau de agitação no tanque de fermentação  | Máximo                              | tratamento incompleto, sedimentação, manutenção, impossibilidade de co-geração  |
| Tipo de agitador                           | Mecânico                            | tratamento incompleto, sedimentação, manutenção, impossibilidade de co-geração  |
| Grau de agitação no tanque de fertilizante | Baixa e logo antes da aplicação     | maior volatilização da amônia, perda de nitrogênio, diminuição do valor nutricional e baixa formação de húmus no solo |

FONTE: Adaptado de (APPELS et al., 2008), (AL SAEDI et al., 2008) e (WU et al., 2016)

### 3.2 BIOGÁS

O biogás produzido pela DA possui um elevado conteúdo energético. É constituído de 50-75% CH<sub>4</sub>, 25-45% CO<sub>2</sub> e o restante são traços de vapor d'água, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>. Em comparação com diversos substratos tratados pela biodigestão, o estrume dos suínos possui a mais alta concentração de CH<sub>4</sub> (65%) e produz 28 m<sup>3</sup>Biogas / t<sub>Lodo</sub>. com poder calorífico de 21 MJ/m<sup>3</sup>, que é apenas 40% menor que o do gás natural (37,3 MJ/m<sup>3</sup>) (AL SEADI et al., 2008)

Outra maneira de avaliar a produção biogás é pela digestão da matéria orgânica do lodo pela ação bacteriana. O QUADRO 2 ilustra um intervalo atual de produção de biogás por digestão de sólidos voláteis encontrado na literatura brasileira e internacional.

QUADRO 2: PRODUÇÃO DE BIOGÁS POR DIGESTÃO DE SÓLIDOS VOLÁTEIS

| REFERÊNCIA           | Produção Biogás (L / g SV) |
|----------------------|----------------------------|
| OLIVEIRA, 1993       | 0,3 - 0,6                  |
| AL SAEDI et al, 2008 | 0,4                        |
| CHAN et al, 2016     | 0,3                        |

FONTE: (OLIVEIRA, 1993), (AL SAEDI et al. 2008) e (CHAN et al. 2016)

Este quadro traz um determinado intervalo de volume produzido de biogás entre 300 e 600 mililitros por grama de matéria orgânica digerida, baseado em pesquisas empíricas de três trabalhos (OLIVEIRA, 1993), (AL SAEDI et al., 2008) e (CHAN et al., 2016). Portanto, em mãos da densidade do resíduo e da percentagem de SV é possível estimar o volume de biogás produzido com base na quantidade de resíduos disponível em um determinado espaço de tempo.

Por um lado, a técnica de DA apresenta diversas adversidades, pode registrar decomposição não integral da matéria orgânica, processo relativamente demorado, associado a expressivo custo de investimento e grandes volumes, sensibilidade das etapas da reação à vários inibidores, presença de H<sub>2</sub>S, siloxanos e umidade que podem danificar equipamentos do grupo gerador de energia e da caldeira (APPELS et al., 2008)

Em contrapartida, é um tratamento natural, liderado por bactérias, que produzem um combustível de fácil armazenamento. Assim, possibilita geração flexível e descentralizada de energia elétrica e térmica. É benéfico para o meio

ambiente, pois diminui o impacto da atividade pecuária na mudança climática, já que impede que o CH<sub>4</sub> da digestão natural do lodo suíno, gás com fator de favorecimento ao aquecimento global 28 vezes maior que o CO<sub>2</sub>, seja emitido na atmosfera (MYHRE et al., 2013). Adicionalmente, o CO<sub>2</sub> emitido é neutro, pois respeita o ciclo da natureza e retorna ao ecossistema em forma de fertilizante com alto valor nutricional. Isso possibilita ao proprietário a acumulação de créditos de carbono.

Complementarmente, o investidor terá a possibilidade de ser remunerado pelo serviço do tratamento biológico para outros proprietários com substratos a tratar, por exemplo, grama, soro do leite, cereais e outros tipos de lodo, pois um reator bem equipado e em operação adequada possibilita a co-fermentação de substratos. Desta forma, o investidor pode contar com receita extra pelo recebimento dos resíduos de terceiros, comercialização de créditos de carbono e, ainda, pela geração elétrica.

Pela ótica macroeconômica, é um fomentador de empregos e desenvolvimento social. A indústria da biodigestão ainda tem muito mercado para explorar, crescer e conjuntamente criar empregos e fortalecer a demanda agregada do setor de energia renovável. Como exemplo, a Alemanha, líder no mercado de biogás na Europa, emprega diretamente 40.000 pessoas no setor que juntas geraram em 2017 produto interno bruto (PIB) de nove bilhões de EUR em bens e serviços (FACHVERBAND BIOGAS, 2017).

- Fluxo de processos de um biodigestor otimizado

O fluxo dos processos de um biodigestor e os equipamentos adequados são importantes para uma boa performance e baixa demanda de mão de obra e manutenção, conforme ilustrado na FIGURA 5.

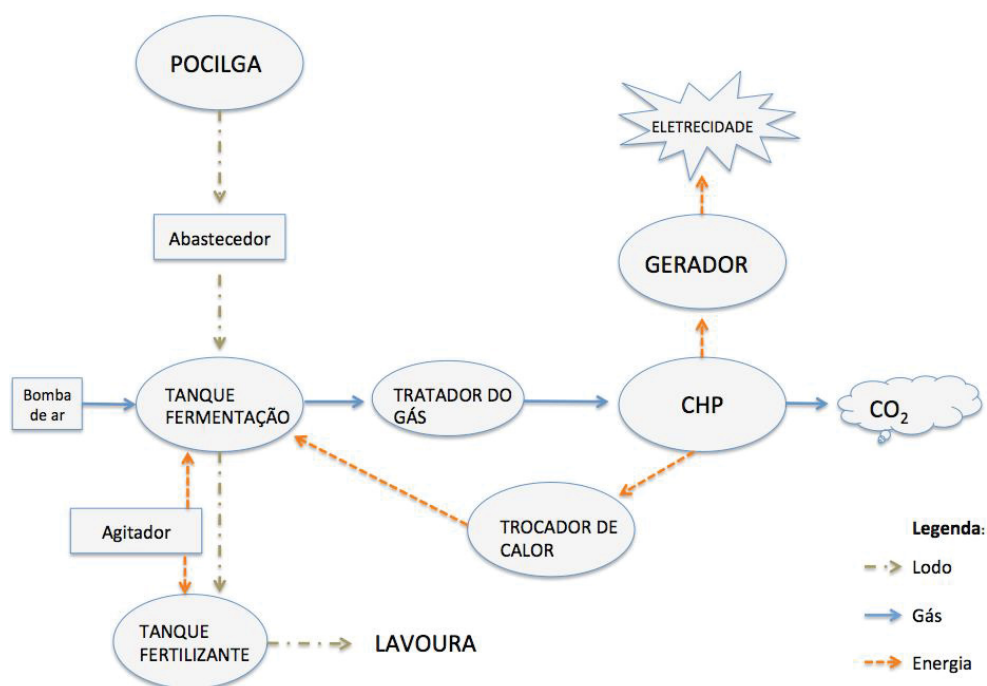
O resíduo do metabolismo dos animais chega até o abastecedor, que alimenta o tanque de fermentação de forma contínua através de, por exemplo, um transportador helicoidal. No tanque de fermentação o lodo é homogeneizado pelo agitador mecânico, cumpre seu TR e atinge sua estabilização bioquímica. O biogás gerado pela ação bacteriana é então enviado para o grupo gerador da unidade combinada de eletricidade e calor (*Combined Heat and Power* - CHP) (FNR, 2008), porém, apenas após ter passado pelo tratamento de gás para diminuir umidade e

siloxanos – composto derivado de silício, comumente encontrado no biogás, que danifica o motor de combustão (ALTERLAT, 2015).

O  $\text{H}_2\text{S}$  também é tratado, pois pode diminuir a vida útil do motor. Seu tratamento é feito por uma bomba que insere ar em um volume equivalente a 4% do biogás dentro do tanque de fermentação. A reação com o  $\text{O}_2$  faz o  $\text{H}_2\text{S}$  precipitar no lodo e, portanto, não prejudica o grupo gerador de energia (BRASUMA, 2017).

O motor da unidade CHP receberá o gás tratado e o usará como combustível. A combustão converte a energia química do gás em energia cinética, que irá sincronizar as bateladas dos pistões com os giros do gerador e resultará em uma corrente elétrica. A eletricidade gerada alimentará os equipamentos do próprio reator e da propriedade. O restante pode ser exportado para a concessionária em forma de créditos de consumo energético. A combustão do gás resulta também em energia térmica, que é aproveitada por um trocador de calor a fim de aquecer o interior do tanque de fermentação e, se desejado, as instalações da propriedade. A FIGURA 5 exemplifica este fluxo de processos de um biodigestor otimizado.

FIGURA 5: FLUXO DE PROCESSOS DE UM BIODIGESTOR OTIMIZADO



FONTE: Elaborado pelo autor

A FIGURA 6 expõe as instalações de um biodigestor de desempenho ótimo, que segue o fluxo processual da FIGURA 5. Além da produção fabril de tijolos, a propriedade conta também com lavoura, produção suínos e um biodigestor para o tratamento e aproveitamento dos resíduos. O fluxo dos processos de biodigestão pode ser identificado, conforme:

1. pocilga (granja)
2. abastecedor
3. tanque de fermentação com aquecedor e agitador
4. unidade CHP com tratador de gás e trocador de calor
5. tanque fertilizante com agitador

FIGURA 6: FOTOGRAFIA AÉREA DAS INSTALAÇÕES DE UM BIODIGESTOR OTIMIZADO



FONTE: Biodigestor da Cerâmica Stein, em Entre Rios do Oeste – PR (BIOKÖHLER, 2017). Uso autorizado pelo autor.

### 3.3 DIMENSÃO DA INDÚSTRIA SUINÍCOLA MUNDIAL

Em 2016, o comércio exterior mundial registrou um fluxo de US\$ 15 bilhões dos quais as exportações de carne suína tiveram uma participação de 0,17% com 11,7 milhões de toneladas vendidas (TRADEMAP, 2017) e o Brasil foi o sétimo maior exportador de carne suína do mundo, com participação de 4,9% das negociações. Além disso, o país encontra em terceiro lugar no ranking de produção mundial, a qual está concentrada em aproximadamente 50% nos estados do Sul (SC, PR e RS). Em relação ao abatimento de cabeças suínas, em segundo e décimo

lugar do ranking mundial se encontram as brasileiras JBS e BRF, com 28 e 9,6 milhões de cabeças abatidas, respectivamente (GUIMARÃES, 2017)

A contribuição deste produto na balança comercial brasileira de 2016 foi positiva em USD 1,4 bilhões e cresceu 15% em comparação com 2015. O maior cliente deste produto nacional é a Rússia, para onde foram destinados 38% do montante exportado. Em segundo e terceiro lugar se encontram Hong Kong e China, com 16 e 14%, respectivamente (TRADEMAP, 2017).

O maior exportador de carne suína do mundo é a Alemanha (15,8%), que registrou no mesmo ano a arrecadação de USD 4,4 bilhões.

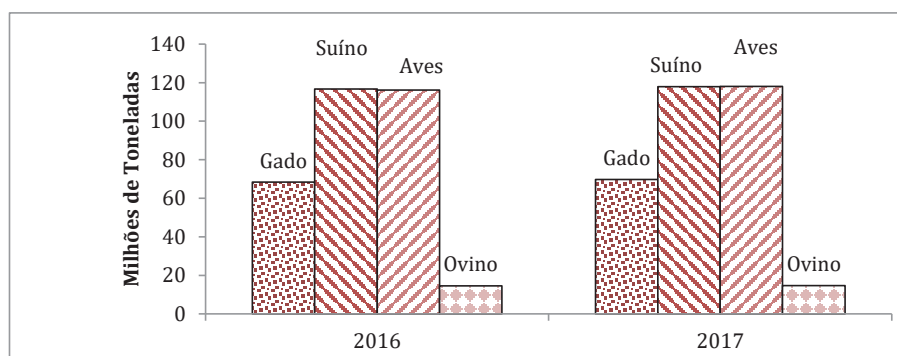
Grandes consumidores de carne de porco podem ter montantes significativos no lado da importação e na produção interna do produto, como a China, que consome mais do que produz internamente.

A China é o maior consumidor e criador de suínos do mundo. De Janeiro a Outubro de 2017 o país registrou 50% de todo consumo e 48% da produção de suínos mundial. Este país ainda conta com a maior empresa suinícola do mundo, a chinesa WH, responsável em 2015 pelo abate de 48,3 milhões de cabeças (GROWTH, 2018)

Dentro do território europeu, a Alemanha é o maior produtor, com 24,9% do total, seguido da Espanha com (16,4%) (GUIMARÃES, 2017)

Em um recente relatório do panorama agropecuário mundial, consta que até 2016 a carne de porco foi a proteína animal mais consumida do mundo. Perdeu o primeiro lugar em 2017 para as aves, conforme FIGURA 7 (OECD;FAO, 2017).

FIGURA 7: CONSUMO MUNDIAL DE CARNES EM 2016 E 2017



FONTE: Adaptado de (OECD; FAO, 2017)



Conforme a FIGURA 7 se identifica crescimento no consumo mundial em todas as carnes. O consumo de carne suína passou de 116,7 em 2016 para 117,93 milhões de toneladas. O aumento do consumo de carne aviária foi mais acelerado e registrou uma tênue superação sobre a suína em 2017 em cerca de 151 mil toneladas, registrando montante de 118,1 milhões de toneladas.

- Perfil da indústria suinícola brasileira

O Serviço Brasileiro de Apoio a Pequenas Empresas (SEBRAE) e a Associação Brasileira dos Criadores de Suínos (ABCS) divulgaram em 2016 o Mapeamento da Suinocultura Brasileira. Dele é possível extrair vislumbrar o posicionamento brasileiro no mercado mundial, o perfil da indústria suinícola brasileira e analisar a distribuição geográfica em função do porte do produtor de suínos brasileiro.

Segundo a publicação, esta indústria contou em 2015 com 126 mil postos de trabalho direto e mais 900 mil postos indiretos, que somados à produção geraram R\$ 19,2 bilhões em impostos para o Estado e um PIB de R\$ 150 bilhões.

A atividade de produção de suínos é dividida entre Antes das Granjas (produção de insumos), Nas Granjas (produção de suínos) e Depois das Granjas (processamento e comercialização de alimentos).

Na fase pré-granja a produção de alimentos soja e milho se destacam com representatividade de 66% do total de insumos consumidos. Na etapa Nas Granjas a atividade de abate representa quase 100% e no ciclo pós-granja os processados linguiça fresca (16%) e bacon (10%) são os principais produtos. Dos insumos industriais da cadeia se sobressaem as despesas com embalagens (60%) e energia elétrica (19%).

São seis os principais tipos de granjas na indústria: UPL – Unidade Produtora de Leitoão, UPD – Unidade Produtora de Desmamados, Crechário, UT – Unidade de Terminação, WTF – *Wean to Finish* e CC – Ciclo Completo.

No Brasil o principal perfil do produtor suinícola é o da combinação da UPL e UT, que consiste na produção de leitões até o peso de 22 a 26 kg na UPL para então serem transferidos à UT, onde vão engordar até 145 kg e encaminhados para o abate.



Em segundo lugar, vem a modalidade do CC, que abraça todos os estágios da produção: gestação, maternidade, creche, engorda e terminação.

De todo o Brasil se destaca os estados do Sul (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul). Juntos somam 66% dos abates em solo nacional ou 26 milhões de cabeças abatidas no ano de 2015.

### 3.4 GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL

O biogás produzido pela DA possui elevado poder calorífico, dada a significativa concentração do  $\text{CH}_4$ . Sua exploração é considerada uma fonte de energia renovável, pois os gases emitidos em sua combustão são oriundos do metabolismo dos animais e, em última instância, da radiação solar, e não de combustíveis fósseis. É ainda mais vantajoso para o meio ambiente, pois a combustão elimina este gás, o qual que é 28 vezes mais nocivo para o aquecimento global que o  $\text{CO}_2$ , por exemplo (MYHRE et al., 2013). A DA ocorreria em certo nível mesmo sem a utilização do biodigestor, assim, sem o tratamento e queima, o  $\text{CH}_4$  subiria invariavelmente para a atmosfera (MACKEY, 2008).

Complementarmente, a técnica da biodigestão pode auxiliar o sistema energético nacional com oferta de corrente elétrica 24 horas por dia ou com fácil conservação de energia potencial em forma de gás (BIASI et al., 2018).

#### 3.4.1 Matriz energética do Brasil e da Alemanha

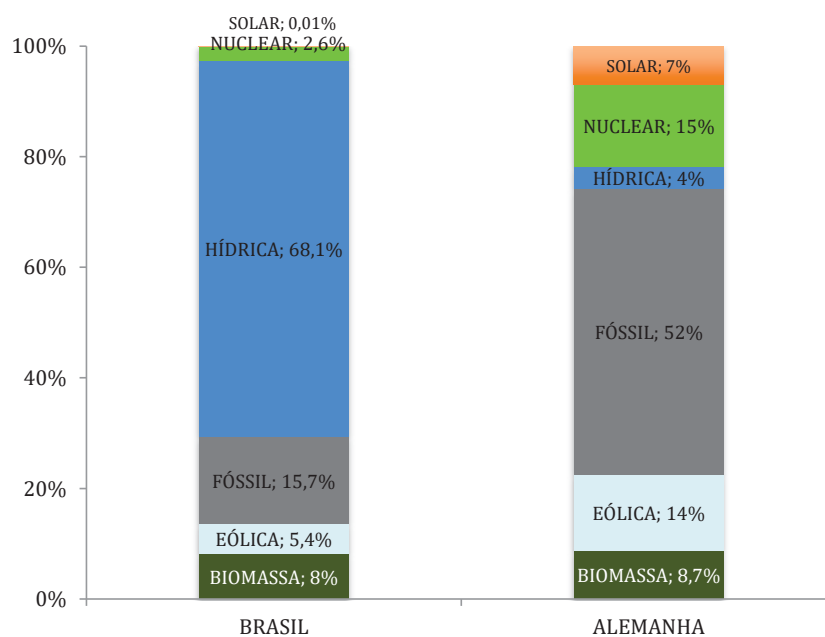
Uma matriz energética ou balanço energético consiste no conjunto de fontes de energia que juntas suprem a demanda de energia de uma região ou país como, por exemplo, combustível para automóveis, eletricidade para indústria, gás para cozinha entre outros. Há também a matriz elétrica, a qual ilustra o conjunto de fontes energéticas responsáveis pela geração e fornecimento de eletricidade ao país ou região (EPE, 2018).

O estudo de uma matriz energética resulta em um esclarecimento sobre o perfil de consumo e volume de emissões de resíduos contaminantes inclusive gases de efeito estufa. Neste trabalho se comparou a matriz elétrica e o balanço energético do Brasil e Alemanha.

- Energia elétrica

A comparação da matriz elétrica do Brasil e da Alemanha, país líder do biogás da Europa, é importante para mostrar o sucesso desta técnica em um país desenvolvido, que conta com muito menos matéria orgânica e área disponível para agropecuária (BANCO MUNDIAL; FAO, 2015). A FIGURA 8 traz a representatividade atual das fontes de fornecimento de eletricidade dos dois países em 2017.

FIGURA 8: GRÁFICO DE COMPARAÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASIL E ALEMANHA EM 2016



FONTE: Adaptado de (ANEEL, 2017) e (FRAUNHOFER, 2017).

A parcela de geração de eletricidade de fonte livre de emissões de carbono no Brasil é vultuosa. Representou 81% ou 473 tWh do total consumido (578,9 tWh) no país em 2016. A energia hidráulica é a fonte mais importante do país, responsável por 68,1% da eletricidade consumida. Em segundo lugar está a energia de combustíveis fósseis com 15,7% e logo após a biomassa com 8% (ANEEL, 2017). Vale divulgar que, em 2016, a Itaipu Binacional bateu o recorde histórico

mundial e gerou, sozinha, 103,1 GWh ou o equivalente a 18% de toda a energia gerada no país (ITAIPU, 2017)

A Alemanha alcançou em 2016 apenas 34% de sua geração total de energia (551,1 tWh) de fontes renováveis. Em primeiro lugar estão os combustíveis fósseis com 52%, representados principalmente por termelétricas de carvão, as quais têm uma importante função de fornecimento térmico à população durante o rigoroso inverno da região. A fonte nuclear vem em seguida, com 15%. Diferente do Brasil, a energia eólica e solar é extensivamente utilizada no país europeu e registraram representatividade de 14 e 7%, respectivamente. A força oriunda da biomassa está em quarto lugar com 9% do total consumido em 2017 (FRAUNHOFER, 2017).

A comparação ilustrada na FIGURA 8 não deixa dúvida que a matriz energética brasileira é mais concentrada do que a matriz alemã, dada a expressividade da geração de energia hidroelétrica e baixa parcela da solar, eólica e nuclear.

Este perfil energético possui uma forte herança da histórica contemporânea. Em 1973 houve o primeiro choque do petróleo e o Brasil decidiu por diminuir sua dependência de importação do produto. Para isso, foi dado início pelo governo militar do general Ernesto Geisel ao Segundo Plano Nacional de Desenvolvimento, também chamado de PND II. Os principais objetivos do plano foram o desestrangulamento da infraestrutura de transporte, produção de bens de capital e geração de energia. A formação bruta de capital fixo foi prioridade e, assim, se deu o início à construção de usinas hidroelétricas de grande porte, ferrovias, siderúrgicas e do programa Proálcool, que desenvolveu a técnica e cadeia de produção do combustível etanol oriundo da cana-de-açúcar (CASTRO, 1985).

As frentes de geração de energia hidroelétrica e produção de biocombustível foram possíveis devido à vastidão de terras rurais para construção de reservatórios de água e plantações de capital intensivo. Tal investimento em infraestrutura leva diversos anos para começarem a trazer os retornos esperados. Se pode dizer, que o Brasil atualmente colhe estes frutos, pois conta com quase 70% de sua matriz elétrica oriunda de fonte renovável hidroelétrica e depende muito pouco de importação de fontes energéticas, como é possível identificar no próximo item.

- Balanço energético

O balanço energético tem o objetivo de demonstrar o caminho que um recurso energético percorre até o seu consumo final. Ele é dividido em três etapas; fonte energética, conversão / tratamento e consumo final. Cada etapa possui suas próprias divisões, como tipos de recursos da fonte energética, por exemplo petróleo, carvão ou gás natural. Tipo de utilização na conversão, como uso do potencial energético para geração elétrica ou calor. E no consumo final é dividido entre setores econômicos como indústria, transportes e edificações.

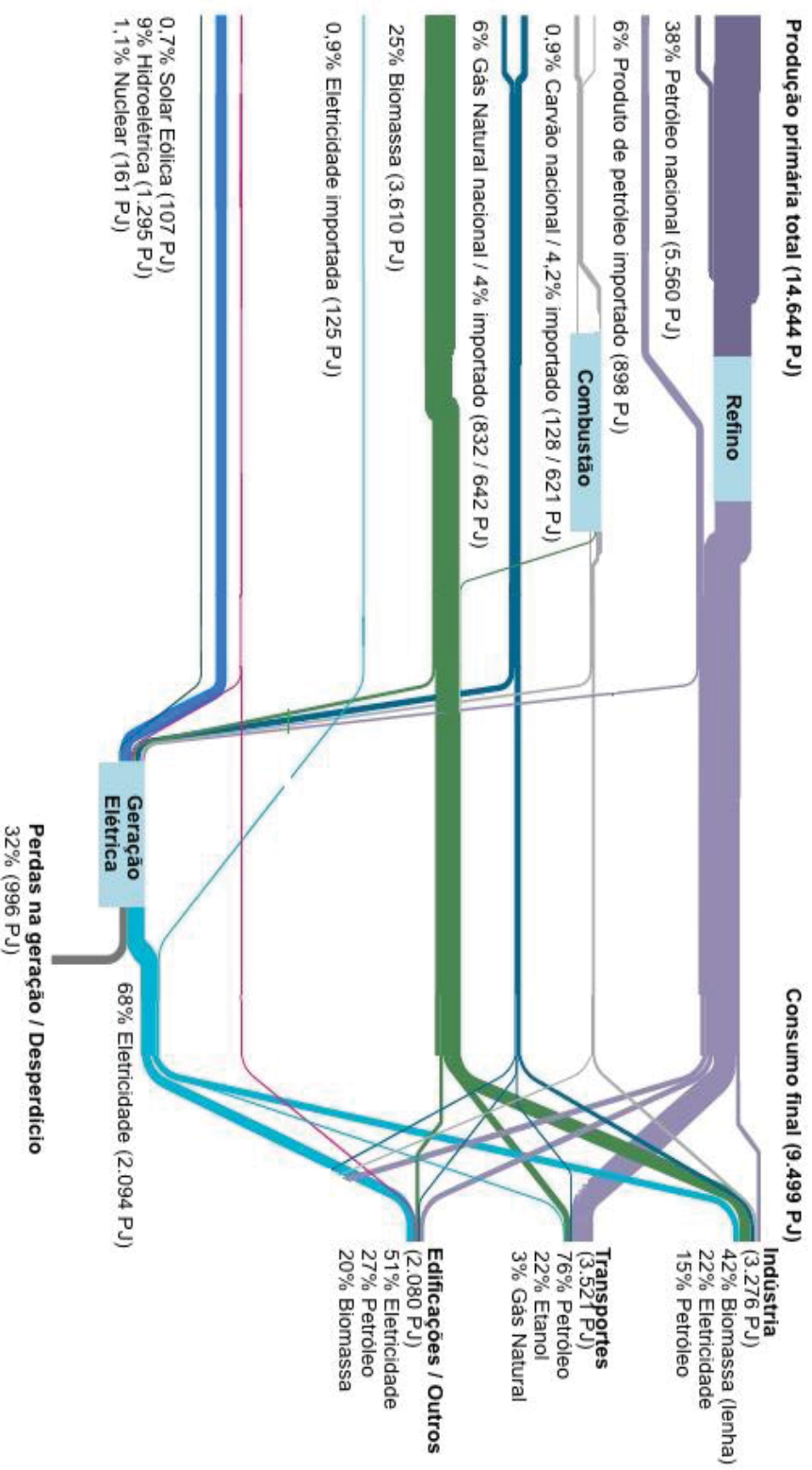
A representação escolhida para o balanço energético foi o Diagrama de Sankey, no qual cada dado é representado por uma faixa. A largura de cada faixa é proporcional ao seu volume ou representatividade. Neste caso o volume é representado pela unidade de energia Petajoules (PJ) e a representatividade em percentagem (%) referente ao total de cada etapa, ambos se encontram abaixo de sua respectiva faixa.

Ao analisar e comparar os diagramas dos dois países elaborados pela *International Energy Agency* (EIA) é possível comparar a origem e o caminho percorrido por cada fonte energética e sua representatividade para a economia de cada país.

Este tipo de diagrama possibilita comparar a eficiência na geração de eletricidade, volume da produção nacional de recursos, principais fontes energéticas e consumo detalhado dos consumidores finais. Dados como estes são importantes, pois moldam políticas públicas e esclarecem fragilidades e fortalezas. Com eles é possível, ainda, estimar o volume de emissões de dióxido de carbono de toda uma economia e não apenas do setor de geração de eletricidade.

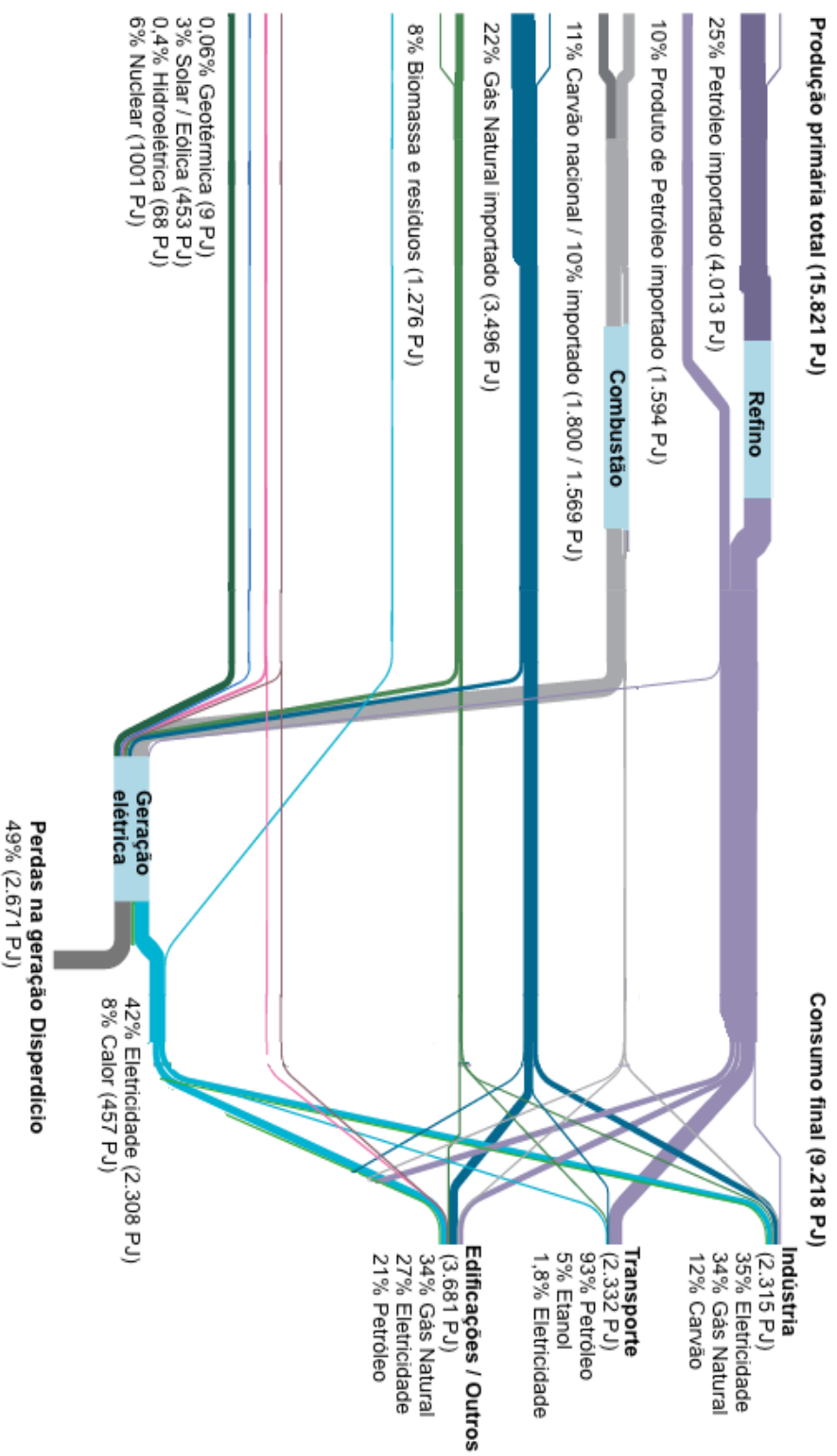
Isso se faz importante para identificar quais países são os maiores colaboradores para a poluição atmosférica ou emissão de gases de efeito estufa e, também, para auxiliar desenvolvimento de políticas públicas que visam controlar e ou onerar a emissão de carbono e poluentes na atmosfera.

FIGURA 9: DIAGRAMA DO BALANÇO ENERGÉTICO DO BRASIL EM 2015



FONTE: Adaptado de IEA, 2015

FIGURA 10: DIAGRAMA DO BALANÇO ENERGÉTICO DA ALEMANHA EM 2015



FONTE: Adaptado de IEA, 2015

Ao analisar o balanço energético de 2015, representado pelos Diagramas de Sankey nas FIGURAS 9 e 10, é possível notar que, apesar da expressiva diferença de área e população entre o Brasil e Alemanha, possuem uma Produção primária total e Consumo final semelhantes. Se identifica também que ambos consomem aproximadamente a mesma quantidade de petróleo, destinado, principalmente, para o setor de transporte. O Brasil, ao contrário da Alemanha, não é dependente de importação da maior parte da utilização deste produto, pois vem da produção nacional.

A Alemanha apresenta uma grande dependência do gás natural na economia, devido sua demanda industrial e, principalmente, pelo aquecimento das Edificações e Outros. É possível destacar, também, a forte representatividade do carvão na produção de energia elétrica na Alemanha. São cerca de 2.600 PJ ou 722.000 GWh equivalentes em carvão destinados às termoeletricas, importado principalmente da Rússia e Austrália (TRADEMAP, 2018).

No Brasil este produto é substituído, em semelhante quantidade, pela biomassa, e seu destino é principalmente a indústria e não a geração de eletricidade, como o país europeu.

Por fim, enquanto a Alemanha registrou 3% do seu balanço em fontes de energia renováveis, como a eólica e solar, no Brasil estas fontes representam apenas 0,7% no balanço de energia. É nítida a representatividade do setor hidroelétrico no país latino-americano, que representa 9% do balanço energético total contra apenas 0,4% no europeu (IEA, 2015).

Por outro lado, o Consumo Final do Brasil e Alemanha, também registram montantes congruentes. Se identifica maior presença do gás natural na Alemanha, principalmente para consumo da indústria e edificações. Enquanto no Brasil se utiliza mais biomassa para gerar calor na indústria. Já no setor de transportes brasileiro, o petróleo divide espaço com o etanol, que moveu 22% da frota nacional em 2015.

Quanto à geração de eletricidade calculou-se que a Alemanha é no geral menos eficiente, já que perde cerca de metade dos seus recursos na etapa da geração, contra um terço de perdas no Brasil. Isso se explica pela expressividade da fonte hidroelétrica na geração de eletricidade do Brasil, a qual não incorre em perdas na geração, apenas na transmissão (SMIL, 2015). No entanto, o Brasil desperdiça

100% do calor gerado pelas geradoras de energia, enquanto a Alemanha registrou um aproveitamento de calor em ordem de 8% do total de energia elétrica gerada no ano (EIA, 2015).

Vale ressaltar que, aproximadamente um terço de todo petróleo e a totalidade de gás natural importado pela Alemanha vem da Rússia (TRADEMAP, 2018). De acordo com a concessionária de fornecimento de gás natural russa Gazprom, em 2019 está previsto o início do funcionamento da nova linha de gás *Nord Stream 2*. Ela conectará os dois países por baixo do Oceano Báltico entre as cidades de São Petersburgo e Greifswald (GAZPROM, 2018).

Esta infraestrutura poderá diminuir o preço do produto na Alemanha e, possivelmente, poderá substituir em parte a demanda por carvão, o que se traduz em uma vantagem, pois termoelétricas movidas à gás natural tendem a demandar menos manutenção, registram despesas de operação menores, são acionadas mais rapidamente e emitem menos gás carbono na atmosfera, em comparação com aquelas movidas à carvão (NREL, 2016).

Maior concentração equivale a maior dependência. Isso é preocupante, pois um efeito negativo na principal fonte de energia pode ter efeitos desastrosos na economia do país, e este risco é menor na Alemanha do que no Brasil, já que sua matriz energética contempla variadas fontes com parcelas mais expressivas.

- Biogás

O setor de biomassa no Brasil é composto por 538 usinas, que somadas possuem capacidade instalada de 14,5 GW. Desta potência, 77% tem origem na queima do bagaço da cana de açúcar e 18% no licor negro (resíduo do processamento de madeira). Apenas 33 usinas ou 0,89% da parcela da biomassa pertencem ao biogás. Da exploração energética do biogás, apenas 4,4 MW ou 0,03% da parcela sua é oriunda da fermentação de resíduos de agropecuários (ANEEL, 2017).

A Alemanha e o Brasil contam com uma parcela de geração de energia a partir da biomassa na matriz energética total semelhantes, com 9 e 8%, respectivamente. Contudo, o setor de biogás no país europeu é muito mais desenvolvido. Em 2016 alcançou a potência instalada de 4,2 GW, suportada por 9.004 usinas, que representam 2,2% de toda a capacidade energética nacional



(FACHVERBAND BIOGAS, 2017). Enquanto no Brasil a capacidade instalada para o aproveitamento deste recurso é de 129,4 MW dividida em apenas 33 plantas (ANEEL, 2017).

A FIGURA 11 abaixo representa através de um Diagrama de Sankey a produção de biogás na Alemanha e no Brasil medida em MW de capacidade instalada. Nele se encontram os dados da capacidade instalada no Brasil, na Alemanha e o total dos dois países.

Este tipo de diagrama ilustra por meio da largura das faixas o volume e representatividade de cada item.

FIGURA 11: GRÁFICO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS DA ALEMANHA E DO BRASIL



FONTE: Adaptado de ELÉTRICA (2017)

Ao analisar a FIGURA 11 é possível notar a discrepância entre os dois países, já que a Alemanha possui uma capacidade instalada em produção de energia elétrica através do biogás 32 vezes maior que a do Brasil (4.200 MW contra 129,4 MW).

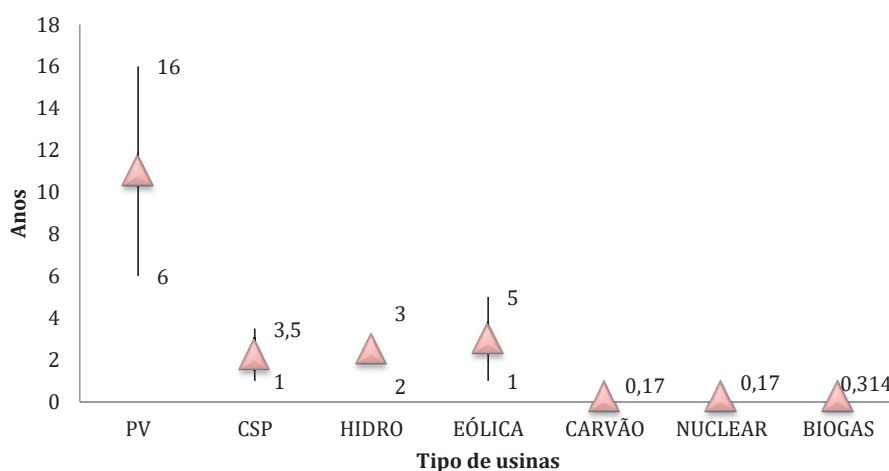
### 3.4.2 Amortização energética

O cálculo da amortização energética traz como resultado a quantidade de tempo em que uma usina deve funcionar a fim de atingir a geração de energia que iguala a quantidade de energia consumida em sua construção e instalação, inclusive

de suas peças e equipamentos. Um recente artigo calcula, por exemplo, que uma torre de energia eólica deve trabalhar um ano inteiro, com alto fator de capacidade, a fim de gerar a quantidade de energia gasta em sua construção e instalação (SMIL, 2016).

A FIGURA 12 ilustra no eixo vertical o intervalo de tempo estimado para amortização energética através de um indicador de mínimo, máximo e médio (representado pela figura geométrica do triângulo). Já o eixo horizontal conta com sete distintas fontes de geração de eletricidade.

FIGURA 12: GRÁFICO DO INTERVALO DE TEMPO PARA AMORTIZAÇÃO ENERGÉTICA POR TIPO DE USINA DE GERAÇÃO DE ENERGIA



FONTE: Adaptado de (WEIßBACH et al., 2013) e (HUNDT, 2010)

Uma publicação de Berlin (WEIßBACH et al., 2013) estima uma média de retorno energético amortizado de 6 a 16 anos para placas fotovoltaicas, de 1 a 3,5 anos para torres de concentração de energia térmica solar (*Concentrated Solar Power* - CSP), de 1 a 5 anos para energia eólica, de 2 a 3 anos para energia hídrica e apenas de 2 meses para termoeletrônica de carvão e nucleares, enquanto outra publicação germânica (HUNDT, 2010) estimou o retorno da energia consumida em plantas de biogás em 0,314 anos ou aproximadamente 3 meses e 23 dias.

Nota-se, portanto, que o biodigestor conta com tempo de amortização energética muito baixo em comparação com as outras renováveis - se encontra apenas atrás das usinas movidas à carvão e ao urânio, as quais possuem distintos riscos ao meio ambiente.

Observa-se também o elevado tempo de amortização energética das placas fotovoltaicas em comparação com a usina de concentração de energia térmica solar. Isso se dá pelo fato de que a CSP é capaz de armazenar energia e gerar eletricidade sem radiação solar.

Além disso, é possível, ainda, dividir as fontes energéticas em dois grupos; as que dependem de condições climáticas para geração de energia e as que são independentes, também chamadas de despacháveis. Ao dividir, se nota que as despacháveis (carvão, nuclear e biogás) possuem tempo de amortização energética muito menores. Isso se dá, pois, o fator de capacidade das usinas despacháveis – a quantidade de tempo que a usina efetivamente gera energia – é muito mais elevado do que outras (fotovoltaica, CSP, hidroelétrica e eólica) que dependem de recursos naturais renováveis para geração.

#### 3.4.3 Geração de energia distribuída

Concessionárias de energia elétrica normalmente trabalham com faixas de preços por kWh diferentes em função da hora do dia. Isso ocorre, pois, o consumo de energia elétrica de um país segue um padrão durante o dia e outro durante a noite. Nas redes urbanas, por exemplo, o maior consumo de energia elétrica é durante a noite, entre as 19 e 22 horas, quando não há mais sol e os integrantes da família realizam suas atividades dentro do lar, que caracteriza o período com maior tensão da rede. Enquanto que, em bairros industriais, corporativos e comerciais, o pico de consumo é durante as horas úteis do dia, principalmente após o almoço em regiões quentes, dado o consumo dos equipamentos de ar-condicionado (ANEEL, 2018).

Além do consumo, é necessário avaliar as fontes de energia. A exploração da radiação solar, por exemplo, não gera energia pela noite e ainda não possui acessível sistema de baterias para armazenagem. Usinas hidráulicas e eólicas também têm sua fragilidade, pois dependem das condições climáticas para converterem energia cinética de suas turbinas em corrente elétrica. Assim, quando o sistema de fornecimento não possui oferta suficiente de fontes renováveis, ele deve acionar outras fontes geradoras a fim de atender a demanda de consumo, principalmente as movidas a carvão e derivados de petróleo, que são de fácil

armazenagem, mas emitem elevado volume de gases do efeito estufa e partículas nocivas ao sistema respiratório (HEAL, 2009).

Uma vez em funcionamento, um biodigestor além de atender a necessidade de energia para o consumo próprio da propriedade onde está instalado, pode comercializar o restante da energia de forma flexível à concessionária e, portanto, aliviar a demanda de fornecimento elétrica em horários de alto consumo (FERREIRA, 2015).

O Sistema de Compensação de Energia Elétrica existe no Brasil desde 2012. Conforme aprovado pela ANEEL através das Resoluções 482-2012 e 687-2015. Juntas, elas permitem que agentes econômicos gerem energia elétrica em suas propriedades, que poderá ser usada para abastecer o consumo próprio e o restante exportado à concessionária em forma de créditos de energia, válidos até 60 meses, que podem ser usufruídos pelas unidades consumidoras cadastradas (ANEEL, 2016).

Recentemente, o Paraná evoluiu positivamente no assunto ao aprovar a Lei nº 378 de 2015 que isenta da incidência de 29% de ICMS geradores de energia elétrica descentralizada com até 1 MW de capacidade instalada (PARANÁ, 2018).

Na Alemanha, há a lei de incentivo à energia renovável, a qual estabelece subsídio em preços de exportação de energia para a concessionária acima do preço de mercado por 20 anos. No Brasil, independente do preço da energia corrente, o investidor será remunerado em créditos de consumo energético (kWh).

Além disso, se pode dizer que os subsídios no país europeu para a biodigestão provocaram um desequilíbrio de mercado, pois à maneira como a lei foi elaborada, houve um forte movimento no sentido de lavouras energéticas. Ou seja, investidores construíram biodigestores e arrendaram terras para plantar lavouras a fim de produzir energia e não alimentos. Isso inflacionou o preço das propriedades e dos alimentos, o que influenciou o Estado a não renovar o subsídio em 2017. Assim, muitos biodigestores, principalmente os menores, estão próximos à falência, já que o prazo de 20 anos do subsídio está próximo ao fim (ELTROP, 2017)

A mesma regra vale para a biodigestão, que é especialmente vantajosa para produtores suinícolas brasileiros que consomem muita energia elétrica para manter a temperatura adequada para os animais dentro das pocilgas, principalmente durante o verão. No entanto, apesar de serem remunerados ao preço de mercado, a receita com a exportação de eletricidade está limitada ao consumo das propriedades

do proprietário ou do condomínio de compensação energética descentralizada, já que a remuneração vem em forma de créditos de consumo e não em meio pecuniário.

O QUADRO 3 resume em pontos positivos e negativos a comparação entre o balanço energético e política de fomento ao biogás no Brasil e Alemanha.

QUADRO 3: SÍNTESE DA COMPARAÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO ENTRE BRASIL E ALEMANHA

| Pontos <b>Positivos</b>                         |   | Pontos <b>Negativos</b>                                  |  |
|---|---|--|--|
| <b>Brasil</b>                                   | <b>Alemanha</b>                                       | <b>Brasil</b>  | <b>Alemanha</b>  |
| 15,7% eletricidade de fonte fóssil              | 21% eletricidade de solar + eólica                    | 5,41 % eletricidade de solar + eólica                    | 52% eletricidade de fonte fóssil                       |
| baixa importação de recursos                    | Aproveita o calor das termoelétricas                  | Desperdiça o calor das termoelétricas                    | elevada parcela de recursos energéticos importados     |
| Biomassa suficiente disponível para biodigestão | 9.004 usinas de biogás (4,2 GW)                       | Apenas 33 usinas de biogás (0,13 GW)                     | Utilização de <i>Energy Crops</i> para atender demanda |
| Remuneração em créditos de energia (kWh)        | Recebimento em dinheiro da exportação de eletricidade | Exportação de energia limitada ao consumo da propriedade | Remuneração em dinheiro, baseado em preço subsidiado   |

FONTE: Adaptado de (ANEEL, 2016), (ELTROP, 2017), (HEAL, 2009) e (EIA, 2015)

## 4 MÉTODOS

Para a realização deste estudo fez-se necessário através de uma modelagem econômica calcular uma expectativa realista de volume produzido de biogás em função das características estabelecidas para o reator - substrato, temperatura, homogeneização e tempo de retenção, a fim de determinar a eficiência na produção de metano e, assim, estimar a expectativa de receita de geração de energia do investimento. Para tal, se utilizou principalmente dos trabalhos realizados por (AL SAEDI et al., 2008), (BOLZONELLA et al., 2005), (APPELS et al., 2008), (IAP, 2009) e (OLIVEIRA, 1993).

Adicionalmente, com base em um orçamento de uma empresa do oeste paranaense para construção e instalação de um biodigestor, conectado na rede para exportação de energia, com 75 kW de potência instalada e valor total de aproximadamente R\$ 400 mil, se calculou os indicadores de retorno econômico-financeiro Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL) para os períodos de 5 e 10 anos.

Segundo a empresa apoiadora deste estudo, prazos de retorno maiores que 10 anos não são bem vistos por potenciais investidores. Ainda mais, um grupo gerador de 75 kW de potência instalada é suficiente para satisfazer a demanda de combustão do biogás de um produtor médio de suínos (entre 3.000 e 10.000 animais) (BIOKÖHLER, 2017).

Para aplicar os conhecimentos de forma prática, foram utilizados quatro cenários fictícios, que representam propriedades de produtores suinícolas, os quais se diferem apenas na quantidade de animais.

### 4.1 ORÇAMENTO, CENÁRIOS E LIMITAÇÕES

Parte dos objetivos deste trabalho foi calcular indicadores financeiros de rentabilidade e determinar o volume mínimo de matéria-prima (lodo suíno) necessário para viabilizar economicamente o investimento em um biodigestor de ótima performance para suinocultura no Brasil. Isso significa encontrar a quantidade

mínima de lodo suíno necessário para que o projeto tenha lucro em 5 e em 10 anos de operação.

O projeto deste reator foi escolhido com objetivo de garantir um processo eficaz sanitariamente, seguro para operadores, com tanques semiesféricos, 75 kW de capacidade instalada para geração de energia, inclusive exportação de eletricidade para a concessionária e troca de calor do motor de combustão com o reator.

A empresa apoiadora deste estudo e fornecedora do orçamento é a Bioköhler Ltda. Localizada em Toledo-PR atua na construção de biodigestores e instalação de equipamentos para tratamento e aproveitamento do biogás desde 2010 (BIOKÖHLER, 2017).

A participação desta empresa neste trabalho foi no fornecimento do orçamento conforme ANEXO 1 - Orçamentos, organização de visitas técnicas a instalações em funcionamento no Oeste do Paraná e solução de dúvidas técnicas assim como parâmetros de operação.

Para a modelagem econômica, quatro cenários fictícios foram escolhidos para as projeções de viabilidade financeira conforme QUADRO 4.

QUADRO 4: ESPECIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS

| <b>Cenário</b> | <b>Quantidade de lodo [<math>\frac{t}{d}</math>]</b> | <b>Equivalente em Animais</b> |
|----------------|--|-------------------------------|
| C1             | 20   | 3.900                         |
| C2             | 30   | 5.850                         |
| C3             | 40   | 7.800                         |
| C4             | 50   | 9.750                         |

FONTE: Adaptado de (OLIVEIRA, 1993) e (AL SAEDI et al, 2008)

Definiu-se que cada cenário representa a propriedade de um produtor de suínos do sistema Ciclo Completo (CC), experiente, localizado no estado do Paraná – Brasil (PR), que busca o projeto de biodigestão para reduzir gastos com o tratamento do lodo dos animais e gerar receita com produção de energia renovável. A única diferença entre eles é a quantidade de animais em sua propriedade.

Os valores para cada cenário foram escolhidos conforme o Mapeamento da Suinocultura Brasileira (SEBRAE; ABCS, 2016), o qual verificou que 43% de todo a

indústria brasileira se encontra na faixa de 3.000 a 10.000 animais por propriedade. Os quatro cenários escolhidos permaneceram neste intervalo.

As limitações deste estudo envolvem o período de análise de até 10 anos, não vislumbra, portanto, a troca de equipamentos no fim da vida útil, que estão previstas para o décimo primeiro, décimo sexto e vigésimo ano de operação.

Outro entrave são aspectos financeiros difíceis de quantificar como o valor econômico do biofertilizante e dos “créditos de carbono”, tendo assim, como receita quantitativa apenas a energia elétrica exportada à concessionária. Adicionalmente, despesas com manutenção e casualidades podem vir a acontecer a cima do estimado no item do fluxo de caixa Manutenção, Seguro e Casualidades. Ademais, se assume que o consumo de eletricidade da propriedade produtora de suínos é proporcional à quantidade de animais e, ainda, que não há diferença de temperatura ambiente, ração animal e raça dos suínos entre os cenários.

Vale a pena também sublinhar que este estudo utilizou um orçamento real de uma empresa que atua no mercado de construção e instalação de biodigestores. Apesar de ser considerada referência no setor é possível que outras empresas ofereçam orçamentos mais ou menos atrativos, o que afetaria diretamente os valores de viabilidade financeira.

Ademais, foi considerado neste trabalho que o biodigestor não é a principal operação do negócio do proprietário, mas sim, uma planta adicional para fazer aproveitamento e uso lucrativo de um passivo ambiental da atividade gerado dentro da empresa. Ainda, a central de custos se limita à planta de biodigestão e não considera, por exemplo, custo do resíduo dos suínos, por ser considerado um passivo que já seria tratado e tampouco os custos de pulverização na lavoura do fertilizante produzido, já que o produtor teria gastos com estas duas atividades mesmo sem a construção da planta de biodigestão.

A fim de minimizar estas externalidades a Planilha de Avaliação de Rentabilidade que faz parte deste trabalho é configurável para diferentes propostas de orçamento, parâmetros de digestão anaeróbia, temperaturas médias, tributação, entre outros itens importantes para o cálculo de viabilidade econômica do projeto.



#### 4.2 VOLUME DIÁRIO DE PRODUÇÃO ÓTIMA DE BIOGÁS

O produto que deve ser calculado como gerador de receita de um biodigestor é, então, o combustível gás metano, presente no biogás e ofertado pelo reator de DA à unidade combinada de calor e eletricidade (CHP). O  $\text{CH}_4$  é o principal componente do biogás do resíduo da suinocultura, com parcela de aproximadamente 65% de concentração. Seu poder calorífico é de 9,97 kW para cada metro cúbico ( $\text{m}^3$ ) (FNR, 2008).

Considerou-se que a energia gerada pelo reator foi utilizada primeiro, para alimentar o próprio consumo e, em seguida, exportar à concessionária.

Como suporte, utilizou-se a pesquisa empírica que ilustrou matematicamente a relação da eficácia do tratamento biológico em função do tempo de retenção (TR) (BOLZONELLA et al., 2005). Neste trabalho, foi utilizada a referência de um reator ótimo ( $40^\circ\text{C}$  de temperatura dentro do tanque de fermentação, com adequada agitação e TR a fim de estimar o volume produzido de biogás.

Este método pode ser, inclusive, utilizado para biodigestores já instalados no Brasil que, por exemplo, não possuem controle de temperatura, com o intuito de estimar o custo oportunidade da aquisição do equipamento.

As três fases do ajuste do volume produzido de biogás são:

- i.temperatura,
- ii.tempo de retenção e
- iii.cinética dos fluidos

Primeiramente, o ajuste de temperatura expressou a eficácia da atividade bacteriana (B), através de uma equação dupla de Arrhenius. Em seguida, o ajuste do TR, que contou, também, com o ajuste cinético da mistura ao método de cálculo, pois, parte do lodo pode passar pelo reator sem cumprir o TR estimado e, conseqüentemente, sem o devido tratamento e, assim, sem a esperada geração de biogás (WU et al., 2016).

Por fim, os cálculos chegaram a um fator de correção, equivalente à eficiência de produção de biogás e de metano expresso em %, conforme  $Fator_{produção\_ótima} [\%]$  da expressão (1).

É importante que o projeto de viabilidade financeira seja feito com a expectativa já corrigida pela eficiência (%) de produção de combustível, pois ela afetará diretamente a receita do projeto e, portanto, a rentabilidade.

Esta modelagem financeira serve para simular o funcionamento de uma planta real. Por objetivar resultados conservadores, se iniciou com o cálculo do potencial de produção de biogás e, ao final, foi calculado o  $Fator_{produção\_ótima}$  [%], pois se entendeu que o reator é incapaz de aproveitar integralmente o potencial de produção de metano do gás.

A expressão (1) ilustra a correção da estimativa de produção de CH<sub>4</sub> do biodigestor.

$$(1) \quad CH_{4_{ótimo}} \left[ \frac{m^3}{d} \right] = CH_{4_{potencial}} \left[ \frac{m^3}{d} \right] \times Fator_{produção\_ótima} [\%]$$

na qual,

$CH_{4_{ótimo}}$  é o volume de metano que pode ser produzido com base nos parâmetros fixos encontrados na literatura;

$Fator_{produção\_ótima}$  refere-se ao percentual calculado em função do perfil do reator a fim de corrigir o  $CH_{4_{potencial}}$ .

#### 4.2.1 Produção potencial de metano

O biogás é o principal produto da decomposição anaeróbica da matéria orgânica (DM), também chamado de sólidos voláteis (SV) ou matéria seca orgânica (oDM). Os microrganismos consomem os SV e liberam como subprodutos principalmente biogás e água. O potencial de geração utópica de biogás deve ser, portanto, medido pela concentração de SV e quantidade de biogás gerado por cada m<sup>3</sup> de matéria orgânica consumida.

A produção potencial de biogás foi determinada pela expressão (1) e representou a quantidade máxima de gás que pode ser gerado em função da quantidade de resíduo disponível.

Cada cenário (C1, C2, C3 e C4) conta com uma diferente quantidade média de resíduos por dia. Por isso, esta fórmula foi aplicada e calculada para cada um deles, conforme demonstra o QUADRO 5.

Naturalmente, o volume de biogás produzido é diretamente proporcional à quantidade de resíduos condicionados à fermentação. A equação (2) ilustra o cálculo do volume de biogás potencial:

$$(2) \quad \text{Biogás}_{\text{potencial}} \left[ \frac{m^3}{d} \right] = Q_{\text{lodo}} \left[ \frac{Mg}{d} \right] \times SV [\%] \times \text{Biogás}_{SV\_destruído} \left[ \frac{m^3}{Mg_{SV}} \right]$$

em que,

$Q_{\text{lodo}}$  é a quantidade de resíduo dos suínos em  $\frac{t}{d}$  destinada ao tratamento, conforme QUADRO 4;

$SV$  representa a parcela sólidos voláteis (SV) no resíduo. Em outras palavras, o coeficiente de matéria orgânica para os microrganismos se alimentarem e

$\text{Biogás}_{SV\_destruído}$  é o parâmetro do volume de biogás gerado para cada tonelada de sólidos voláteis digerida.

O QUADRO 5 apresenta os valores dos parâmetros supracitados utilizados para a aferição do volume de biogás que se espera na produção.

QUADRO 5: PARÂMETROS PARA CÁLCULO DO BIOGÁS POTENCIAL

| DESCRIÇÃO                       | UNIDADE                              | C1  | C2 | C3 | C4 |
|---------------------------------|--------------------------------------|-----|----|----|----|
| $Q_{\text{lodo}}$               | $\left[ \frac{Mg}{d} \right]$        | 20  | 30 | 40 | 50 |
| $SV$                            | $[\%]$                               | 6   |    |    |    |
| $\text{Biogás}_{SV\_destruído}$ | $\left[ \frac{m^3}{Mg_{SV}} \right]$ | 400 |    |    |    |

FONTE: Adaptado de (AL SAEDI et al., 2008, pg. 19)

A parcela de  $CH_4$  no biogás varia de acordo com o tipo de substrato. Assim, para determinar o volume potencial de metano gerado basta multiplicar o volume de biogás pela concentração de  $CH_4$ .

A equação (3) exemplifica o cálculo para o volume potencial de metano:

$$(3) \quad CH_{4potencial} \left[ \frac{m^3}{d} \right] = Biogás_{potencial} \left[ \frac{m^3}{d} \right] \times CH_{4biogás} [\%]$$

na qual,

$CH_{4biogás}$  é igual a 65% (AL SEADI et al., 2008)

#### 4.2.2 Ajuste de temperatura

A temperatura da reação afeta a atividade bacteriana e quão rápido a matéria orgânica será consumida. Cada grupo de microrganismos tem um intervalo em que sua atividade é maximizada, e, fora deste intervalo, o desempenho diminui.

A equação (4) representa a eficácia do tratamento em relação a temperatura da reação através de uma equação de Arrhenius dupla:

$$(4) \quad B = k4^{(k5 \times (T-k6))} - k7^{(k8 \times (T-k6))}$$

na qual,

$B$  é a atividade bacteriana de destruição dos SV;

$T$  é temperatura do reator igual a 40°C e

$k4$ ,  $k5$ ,  $k6$ ,  $k7$  e  $k8$  são constantes do modelo de (WU et al., 2016).

Conforme modelo definido pelo autor (WU et al., 2016), a atividade bacteriana é igual ao valor 1 (neutra) quando a temperatura do reator ( $T$ ) for 35°C. Portanto, a uma temperatura mais elevada o reator registra atividade de decomposição mais intensa e mais eficiente. Analogamente, se a temperatura for menor do que 35°C, a produção de biogás vai ser afetada negativamente.

Em seguida, se demonstrou a expressão do TR e o combinou com o ajuste de temperatura a fim de criar o fator de ajuste à estimativa inicial.

#### 4.2.3 Ajuste do tempo de retenção

As bactérias precisam de algum tempo para processar o substrato recém entrado no tanque de fermentação. Este intervalo é conhecido como tempo morto (TM) e é estimado em aproximadamente 4 dias (APPELS et al., 2008).

Recentes estudos observaram que a relação entre TR e produção de biogás é logarítmica (ZHANG et al., 2007), conforme ilustrado na FIGURA 4.

Para ajustar o fator da expressão (1) em função também do TR e do TM utilizou-se o modelo proposto por (BOLZONELLA et al., 2005).

A equação (5) adapta o volume de biogás de acordo com o TR e TM:

$$(5) \quad Eficiência_{tratamento} [\%] = \frac{B \times k_1 \times (TR - TM)}{1 + B \times k_1 \times (TR - TM)}$$

na qual, a eficiência da DA ( $Eficiência_{tratamento} [\%]$ ) é expressa em função da atividade bacteriana (B) da equação (4), da constante  $k_1$ , e do TR descontado o TM que são de 30 e 4 dias, respectivamente.

Estes valores são constantes para os quatro cenários e estão registrados no QUADRO 6.

QUADRO 6: PARÂMETROS PARA CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO

| DESCRIÇÃO           | UNIDADE | VALOR |
|---------------------|---------|-------|
| Tempo Retenção (TR) | d       | 30    |
| Tempo Morto (TM)    | d       | 4     |
| K1                  | -       | 0,2   |

FONTE: Adaptado de (APPELS et al., 2008) e (BOLZONELLA et al., 2005)

Em seguida se adicionou à equação o ajuste cinético dos movimentos do lodo no reator para, por fim, chegar ao  $Fator_{produção\_ótima} [\%]$ , fator multiplicador da expressão (1).

#### 4.2.4 Ajuste cinético da mistura

O lodo, dentro do reator, é agitado principalmente por equipamentos e, em menor parte, pelos fluxos de convecção térmica da DA. Como a densidade do lodo

suíno ( $1,026 \frac{t}{m^3}$ ) é muito próxima à da água, parte dele pode sair do reator antes do TR estabelecido e, portanto, sem o tratamento biológico adequado. Uma empresa britânica chamada *Aqua Enviro* divulgou uma pesquisa evidenciando que, devido à cinética do substrato em reatores da região pesquisada, 39% do lodo sai do reator ainda quimicamente instável, antes de completar metade do TR (aproximadamente 30 dias), e 13% sai após completar o dobro do TR (WU et al., 2016).

Para simplificar, se assumiu matematicamente que 39% do lodo sai do reator ao completar 50% do TR e 13% ao completar 200% do TR, ou 60 dias. Portanto, para calcular este ajuste precisou-se, primeiro, calcular a expressão (6) para 50% do TR:

$$(6) \quad Eficiência_{tratamento_{50\%TR}} [\%] = \frac{B \times k_1 \times (0,5 \times TR - TM)}{1 + B \times k_1 \times (0,5 \times TR - TM)}$$

e em seguida adaptar a mesma equação para 200% do TR:

$$(7) \quad Eficiência_{tratamento_{200\%TR}} [\%] = \frac{B \times k_1 \times (2 \times TR - TM)}{1 + B \times k_1 \times (2 \times TR - TM)}$$

isso feito, se calculou a média ponderada conforme as proporções supracitadas, que resultou no  $Fator_{produção\acute{o}tima} [\%]$ , multiplicador da expressão (1):

$$(8) \quad Fator_{produção\acute{o}tima} [\%] = k_9 \times Eficiência_{tratamento_{50\%TR}} [\%] + k_{10} \times Eficiência_{tratamento_{200\%TR}} [\%] + (1 - k_9 - k_{10}) \times Eficiência_{tratamento} [\%]$$

na qual,

$k_9 = 39\%$  e  $k_{10} = 13\%$  e multiplicados com a  $Eficiência_{tratamento_i}$  para 50% e 200% do TR, representam, respectivamente, os 39% que saem do reator aos 50% da TR e os 13% que saem do reator com o dobro de TR, respectivamente.

#### 4.2.5 Conversão para comparação do resultado obtido com a literatura

A fim de comparar o volume ótimo de metano produzido  $\left[\frac{m^3}{d}\right]$ , já com os ajustes supracitados, com o intervalo obtido da literatura  $\left[\frac{L}{g\ SV}\right]$ , se converteu as unidades e multiplicou pela fórmula de  $Fator_{produção\ ótima}$  (8).

A fórmula (9) quantifica a produção ótima de biogás e converte suas unidades, a fim de possibilitar a comparação com outras fontes de pesquisa.

$$(9) \quad Produção_{biogás} \left[ \frac{L}{g\ SV} \right] = \left( \frac{Biogás_{potencial} \left[ \frac{m^3}{d} \right] \times 10^3 \left[ \frac{L}{m^3} \right]}{Q_{lodo} \left[ \frac{Mg}{d} \right] \times SV\ [\%] \times 10^6 \left[ \frac{g}{Mg} \right]} \right) \times Fator_{produção\ ótima}$$

#### 4.2.6 Geração de energia da combustão do biogás

O biogás produzido no reator é tratado e chega à unidade de geração de energia elétrica e térmica (*Combined Heat and Power* - CHP), onde é levado à combustão e tem sua energia química transformada em energia cinética, elétrica e térmica.

Para chegar a quantidade de energia elétrica ( $Energia_E$ ) e térmica ( $Energia_T$ ) líquida produzida e disponível em um dia, se multiplicou o volume diário de  $CH_{4\ ótimo}$  produzido, equação (1), pelo poder calorífico ( $Pc_{CH_4}$ ), pela eficiência do motor elétrico ( $Ef_E$ ) e do trocador de calor ( $Ef_T$ ), subtraído o consumo elétrico e térmico do biodigestor ( $Con_E$ ,  $Con_T$ ). Assim se deu origem às fórmulas (10) e (11).

(10)

$$Energia_E \left[ \frac{kWh}{d} \right] = CH_{4\ ótimo} \left[ \frac{m^3}{d} \right] \times Pc_{CH_4} \left[ \frac{kWh}{m^3_{CH_4}} \right] \times Ef_E\ [\%] - Con_E \left[ \frac{kWh}{d} \right]$$

(11)

$$Energia_T \left[ \frac{kWh}{d} \right] = CH_{4\ ótimo} \left[ \frac{m^3}{d} \right] \times Pc_{CH_4} \left[ \frac{kWh}{m^3_{CH_4}} \right] \times Ef_T\ [\%] - Con_T \left[ \frac{kWh}{d} \right]$$

Sendo que, o consumo elétrico do reator segundo a empresa fornecedora do orçamento é de 40 kWh/d o consumo térmico ( $Con_T [\frac{kWh}{d}]$ ) é a soma do calor necessário para aquecer o lodo e a perda de calor para o ambiente conforme equação (12).

$$(12) \quad Con_T [\frac{kWh}{d}] = \{k11 \times Q_{lodo} [\frac{Mg}{d}] \times Cp_{lodo} [\frac{kJ}{kg \times T}] \times (T - T_{lodo})\} \times (1 + k12)$$

Na qual,

K11 é o fator de conversão de unidades;

$Cp_{lodo} [\frac{kJ}{kg \times T}]$  é o coeficiente de calor específico do lodo;

$T$  é a temperatura escolhida do reator = 40 °C;

$T_{lodo}$  é a temperatura estimada do lodo ao entrar no reator e

K12 é a estimativa assumida de perda de calor para o ambiente.

O QUADRO 7 de geração diária de energia ilustra os parâmetros utilizados, que são iguais para todos os cenários.

QUADRO 7: VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DE GERAÇÃO DIÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA E TÉRMICA

| DESCRIÇÃO   | UNIDADE                    | C1     | C2 | C3 | C4 | REFERÊNCIA            |
|-------------|----------------------------|--------|----|----|----|-----------------------|
| $Pc_{CH_4}$ | $[\frac{kWh}{m_{CH_4}^3}]$ | 9,97   |    |    |    | (FNR, 2006)           |
| $Ef_E$      | [%]                        | 37     |    |    |    | (BIO TECH, 2008)      |
| $Con_E$     | $[\frac{kWh}{d}]$          | 40     |    |    |    | (BIOKÖHLER, 2018)     |
| $Ef_T$      | [%]                        | 45     |    |    |    | (BIO TECH, 2008)      |
| $Cp_{lodo}$ | $[\frac{kJ}{kg \times T}]$ | 4,18   |    |    |    | (APPELS et al., 2008) |
| $T$         | [°C]                       | 40     |    |    |    | -                     |
| $T_{lodo}$  | [°C]                       | 20     |    |    |    | -                     |
| $k11$       | -                          | 0,2778 |    |    |    | -                     |
| $k12$       | [%]                        | 30     |    |    |    | -                     |

FONTE: Adaptado de (FNR, 2006), (BIO TECH, 2008), (BIOKÖHLER, 2017) e (APPELS et al., 2008)

Por fim, para estimar receita diária pela exportação de eletricidade à concessionária, se multiplicou a quantidade de energia elétrica líquida produzida,



equação (10), pela tarifa atual de consumo ( $Tar_E [\frac{R\$}{kWh}]$ ) e se descontou a tributação  $ICMS$  [%].

A equação (13) indica o cálculo do crédito de energia diário:

$$(13) \quad Receita_{Exp} [\frac{R\$}{d}] = Energia_E [\frac{kWh}{d}] \times Tar_E [\frac{R\$}{kWh}] \times (1 - ICMS [\%])$$

sendo que,

$Tar_E = 0,52827 [\frac{R\$}{kWh}]$  e se enquadra na Faixa Convencional Rural do Paraná (COPEL, 2018) e, ainda, o Paraná isentou a cobrança do ICMS equivalente a 29% dos micro- e minigeradores de energia distribuída (menos de 1 MW de potência instalada), portanto para este projeto o ICMS é igual a zero (PARANÁ, 2018).

O aproveitamento da energia térmica da combustão pelo reator pode ser considerado também uma economia para o proprietário ( $Receita_T$ ), pois configura uma diminuição da despesa com gás natural para manter as condições de temperatura ótimas no tratamento biológico.

A equação (14) iguala a quantidade monetária economizada ao converter a demanda de energia térmica em volume equivalente de gás natural (GN) e multiplicado por sua tarifa de consumo:

$$(14) \quad Receita_T [\frac{R\$}{d}] = \left( \frac{Con_T [\frac{kWh}{d}]}{PC_{GN} [\frac{kWh}{m^3}]} \right) \times Tar_{GN} [\frac{R\$}{m^3}]$$

na qual:

$PC_{GN} = 11,11 [\frac{kWh}{m^3}]$  é o poder calorífico do gás natural;

$Tar_{GN} = 2,262 [\frac{R\$}{m^3}]$  representa a tarifa de consumo (COMPAGÁS, 2017).

Contudo, por ter investido na aquisição de um equipamento de trocador de calor para manter o reator aquecido, esta economia não foi contabilizada como

receita para o projeto e, por isso, não influencia em seu cálculo de viabilidade financeira.

#### 4.2.7 Produção de biofertilizante

O reator de DA possui um ciclo fechado, no qual o insumo é o resíduo dos animais e o produto é o gás e o lodo pós-fermentação, também chamado de biofertilizante. Sua composição é rica em nitrogênio, fósforo, potássio e micronutrientes e pode substituir adubos químicos na produção de alimentos convencionais e orgânicos (AL SAEDI et al., 2008).

No entanto, ainda não se consegue controlar sem análise laboratorial a concentração destes nutrientes no fertilizante produzido a fim de suprir a demanda de uma lavoura de capital intensivo e, por isso, a substituição do adubo químico ainda não é integral (BIOKÖHLER, 2018).

Desta forma, este trabalho calculou o volume produzido de biofertilizante, conforme equação (15), e o adicionou à planilha avaliadora de rentabilidade, mas tampouco não se atribuiu monetização ou contabilização na receita.

$$(15) \quad \text{Biofertilizante} \left[ \frac{m^3}{d} \right] = \frac{Q_{\text{lodo}} \left[ \frac{Mg}{d} \right] - \left( \text{Biogás potencial} \left[ \frac{m^3}{d} \right] \times \rho_{\text{biogás}} \left[ \frac{Mg}{m^3} \right] \right)}{\rho_{\text{biofertilizante}} \left[ \frac{Mg}{m^3} \right]}$$

em que,

$Q_{\text{lodo}}$  é a quantidade de lodo adicionada por dia ao reator;

$\text{Biogás potencial}$  é a produção de biogás, dado equação (2);

$\rho_{\text{biogás}}$  é a densidade do biogás igual a  $1,22 \frac{kg}{m^3}$  (AL SAEDI et al., 2008)

e;

$\rho_{\text{biofertilizante}}$  é a densidade do biofertilizante igual a  $1.010,32 \frac{kg}{m^3}$  (KUNZ; OLIVEIRA, 2006).

#### 4.2.8 Produção de certificados de redução de emissões de carbono (CRE)

A emissão de Certificados de Redução de Emissões (CRE) também conhecidos como “créditos de carbono” e sua comercialização fazem parte do rol de iniciativas do tipo *cap and trade*<sup>1</sup> objetivadas a controlar e diminuir a emissão dos gases de efeito estufa. Cada CRE representa uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO<sub>2</sub>e) que deixou de ser emitido na atmosfera.

Com a atividade de biodigestão de resíduos é possível emitir CRE, pois ao gerar energia com a queima do biogás impede-se que o metano seja emitido na atmosfera. A equação (16) descreve a quantificação de tCO<sub>2</sub>e para base de cálculo do CRE:

$$(16) \quad tCO_2e \left[ \frac{t}{d} \right] = CH_{4\delta tmo} \left[ \frac{m^3}{d} \right] \times \rho_{CH_4} \left[ \frac{t}{m^3} \right] \times VPAG_{CH_4}$$

em que,

$CH_{4\delta tmo} \left[ \frac{m^3}{d} \right]$  é o volume de gás metano produzido já corrigido conforme equação (1);

$\rho_{CH_4} \left[ \frac{t}{m^3} \right]$  representa a densidade do gás metano que equivale a 0,72  $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  (AL SEADI et al., 2008) e;

$VPAG_{CH_4}$  trata do Valor Potencial de Aquecimento Global (VPAG) do gás metano, em comparação com o dióxido de carbono em um limite de 100 anos, que é igual a 28 (MYHRE et al., 2013)

#### 4.3 RETORNO ECONÔMICO-FINANCEIRO

O termo CAPEX vem do inglês *capital expenditure*<sup>2</sup> e remete ao dispêndio pecuniário feito por uma firma a fim de aumentar, incrementar, melhorar ou atualizar sua estrutura produtiva. Se pode usar como sinônimo investimento, capital inicial ou inversão.

---

<sup>1</sup> Capturar e comercializar

<sup>2</sup> Investimentos em capital fixo

Neste trabalho, o investimento em questão é uma planta de biodigestão com capacidade instalada de 75 kW, no valor total de aproximadamente R\$ 400 mil, que gera receita adicional à produção pecuária. Sendo assim, é cabível e recomendado que se faça uma projeção de fluxos de caixa a fim de concluir se a inversão proposta é vantajosa financeiramente ou não. Em outras palavras, se será lucrativa ou não para o investidor.

Isso se faz especialmente importante para o setor de proteção ambiental e geração de energia renovável, pois por mais que o setor capitalista não deseje prejudicar o meio ambiente, ele só fará uso da técnica que polui menos, caso ela não o faça mais pobre (HEAL, 2009).

Por isso, se apresentou as fórmulas utilizadas para projetar os fluxos de caixa no futuro e estimar o retorno financeiro e lucratividade - levando em conta a correção monetária ao longo dos anos, depreciação do maquinário, pagamento de financiamento bancário, despesas operacionais e tributação.

#### 4.3.1 Receita diária e anual

A receita da planta é identificada pela Receita Operacional Líquida (ROL), que é a remuneração pela energia elétrica exportada para a concessionária (13) multiplicado pela quantidade de dias de operação em um ano.

A fórmula (17) mostra o cálculo da ROL:

$$(17) \quad ROL \left[ \frac{R\$}{a} \right] = Receita_{Exp} \left[ \frac{R\$}{d} \right] * 330 \left[ \frac{d}{a} \right]$$

na qual,

a operacionalidade da planta foi estimada em  $330 \left[ \frac{d}{a} \right]$  e utilizará o restante dos dias para pequenos reparos e imprevisibilidades.

#### 4.3.2 Depreciação

A depreciação de ativos é considerada uma despesa contábil e deve constar na projeção do fluxo de caixa (FONSECA, 2012). Para seu levantamento, se adotou

que o grupo gerador de energia elétrica e térmica ( $CAPEX_{CHP}$ ) resiste a 10 anos de operação, o maquinário ( $CAPEX_{maq}$ ) se deprecia totalmente em 16 anos e o restante da estrutura de construção ( $CAPEX_{fer}$ ) em 20 anos.

A equação (18) contempla o cálculo destes três distintos períodos e o QUADRO 8 registra o montante do CAPEX do CHP, maquinário e fermentador.

$$(18) \text{ Depreciação } \left[ \frac{R\$}{a} \right] = \frac{CAPEX_{maq}[R\$]}{16 [a]} + \frac{CAPEX_{CHP}[R\$]}{10 [a]} + \frac{CAPEX_{fer}[R\$]}{20 [a]}$$

TABELA 1: CAPEX

| DESCRIÇÃO       | VALOR (R\$) |
|-----------------|-------------|
| $CAPEX_{maq}$   | 101.039,66  |
| $CAPEX_{CHP}$   | 155.000,00  |
| $CAPEX_{fer}$   | 92.293,00   |
| $CAPEX_{total}$ | 348.332,66  |

FONTE: Adaptado de (BIOKÖHLER, 2017)

O orçamento do projeto assim como as projeções de fluxo de caixa para cada cenário está disponível para consulta no ANEXO 1 - Orçamentos.

#### 4.3.3 Operação

O reator funciona em grande parte automaticamente. Contudo, ainda, se faz necessária mão-de-obra (MDO), estimada em 4 horas por dia (WU et al., 2016). A equação (19) explica o cálculo do gasto com a MDO para operação biodigestor:

$$(19) \text{ OP } \left[ \frac{R\$}{ano} \right] = MDO \left[ \frac{h}{d} \right] \times MDO \left[ \frac{R\$}{h} \right] \times 330 \left[ \frac{d}{a} \right]$$

na qual,

a  $MDO \left[ \frac{R\$}{h} \right]$  se calculou com base em um salário de R\$ 2.000 por mês para 48 horas semanais (TRABALHA BRASIL, 2018) e se assume correção anual de 3%.

É comum em propriedades de produtores rurais trabalhadores fazerem mais de uma função. Por isso, se presume que a MDO não será exclusiva para operação biodigestor.

O QUADRO 9 exemplifica o cálculo de despesa com a operação do biodigestor com base na remuneração supracitada.

QUADRO 8: DESPESA OPERACIONAL COM MÃO-DE-OBRA

| DESCRIÇÃO    | UNIDADE         | VALOR |
|--------------|-----------------|-------|
| Tempo de MDO | $\frac{h}{d}$   | 4     |
| Preço da MDO | $\frac{R\$}{h}$ | 10,42 |

FONTE: Adaptado de (WU et al., 2016)

#### 4.3.4 Manutenção, seguro e casualidades

Assume-se que manutenção e seguros são necessários para a operação de qualquer equipamento e, ainda, que casualidades podem acontecer e por isso devem ser levadas em conta. Estimamos 2% a.a. do CAPEX total para cada um desses três itens.

A equação (20) apresenta o cálculo desta provisão:

$$(20) \quad MSC \left[ \frac{R\$}{a} \right] = (CAPEX_{total} [R\$]) \times 2\% \times 3$$

O QUADRO 10 registra o valor do  $CAPEX_{total}$  e ilustra a provisão contábil para os itens manutenção, seguro e casualidades.

QUADRO 9: MANUTENÇÃO, SEGURO E CASUALIDADES

| DESCRIÇÃO       | UNIDADE | VALOR      |
|-----------------|---------|------------|
| $CAPEX_{total}$ | [R\$]   | 348.332,66 |
| Manutenção      | [%]     | 2          |
| Seguro          | [%]     | 2          |
| Casualidades    | [%]     | 2          |

FONTE: Adaptado de (BIOKÖHLER, 2017)

#### 4.3.5 Financiamento

A linha de crédito escolhida para este trabalho foi a INOVAGRO, pois com base na simulação feita em Dezembro 2017, ela oferece aos produtores rurais juros

subsidiados de 6,5% a.a. e financiamento de 100% do projeto para incorporação de inovação tecnológica para aumento de competitividade e geração de energias renováveis. Esta linha é custodiada pelo Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES), distribuída pelo Banco do Brasil (BB) e utiliza o Sistema de Amortização Constante (SAC) para o cálculo das parcelas de pagamento anual (BANCO DO BRASIL, 2017).

O valor total do orçamento em questão foi de R\$ 401.774, incluído MDO, carência de 1 ano amortização com incidência de juros na carência e prazo de liquidação de 10 anos em 9 parcelas. A despesa financeira do financiamento por ano é o valor fixo da parcela de R\$ 44.641,55 (valor total do financiamento dividido pelo número de parcelas), acrescido o juros correspondente do período. Os detalhes da proposta de tomada de crédito se encontram no QUADRO 11.

QUADRO 10: FINANCIAMENTO

|                                    |                      |
|------------------------------------|----------------------|
| <b>BANCO</b>                       | BANCO DO BRASIL S.A. |
| <b>LINHA DE CRÉDITO</b>            | INOVAGRO             |
| <b>VALOR A FINANCIAR</b>           | R\$ 401.774,00       |
| <b>PERIODICIDADE DE PAGAMENTOS</b> | ANUAL                |
| <b>NÚMERO DE PARCELAS</b>          | 9                    |
| <b>SISTEMA DE AMORTIZAÇÃO</b>      | SAC                  |
| <b>CARÊNCIA</b>                    | 1 ANO                |
| <b>JUROS NA CARÊNCIA</b>           | SIM                  |
| <b>TAXA DE JUROS AO ANO</b>        | 6,5%                 |
| <b>IOF</b>                         | 0,38%                |

FONTE: Adaptado de (BANCO DO BRASIL, 2017)

#### 4.3.6 Lucro ou prejuízo

Para calcular o resultado líquido do período, também chamado de lucro, quando positivo, ou prejuízo, quando negativo, se faz necessário somar as receitas e diminuir as despesas e custos. Para isso, se utilizou a receita operacional líquida (ROL) e dela se subtraiu todas as despesas (FONSECA, 2012).

A equação (21) exhibe o cálculo do resultado líquido:

$$(21) \text{ Resultado}_{liq} [R\$] = ROL [R\$] - Custos e Despesas [R\$]$$

na qual,

as despesas são descritas pelas fórmulas (18, 19 e 20) acrescido da despesa financeira com financiamento, que podem ser consultadas no Apêndice 1 – Fluxos de Caixa e Amortização da Dívida Bancária.

#### 4.3.7 Valor presente líquido (VPL)

O cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) foi realizado através de um método de desconto financeiro que trouxe para o presente o fluxo de caixa futuro, corrigido pela Taxa Mínima de Atratividade (TMA) (FONSECA, 2012).

Para calcular o VPL em um fluxo de caixa não uniforme se utiliza a equação (22) (BUDEL, 2017):

$$(22) \quad VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - FC_0$$

na qual,

$FC_t$  é o fluxo de caixa no ano  $t$ ;

$FC_0$  é o montante do investimento inicial;

“ $i$ ” representa a TMA [%] escolhida, que neste trabalho é de 10,8%

e

“ $n$ ” é o período estimado para o projeto (5 ou 10 anos).

O cálculo do VPL foi feito para todos os cenários ao longo dos períodos escolhidos.

O valor de 10,8% da TMA foi escolhido, pois é a média ponderada da Taxa Básica de Juros do Brasil (SELIC) nos últimos dez anos. Histórico desta taxa se encontra no Anexo 2 – Taxa Selic.



#### 4.3.8 Taxa interna de retorno (TIR) e taxa mínima de atratividade (TMA)

Para calcular a TIR, se utiliza a fórmula do VPL (22). Se iguala o VPL a zero e a resolve para encontrar a taxa “i”. Neste trabalho, os cálculos foram feitos com a ferramenta Microsoft Office Excel (EXCEL) através de sua fórmula específica para este índice.

Quando o  $VPL=0$  a interpretação é que o projeto se pagou, em outras palavras, os fluxos de caixa foram descontados de forma a não darem lucro ou prejuízo e que a TMA “i” é igual a TIR, ou seja, registra uma minimamente satisfatória viabilidade financeira da planta, levando em conta a correção monetária ao longo do tempo (FONSECA, 2012).

#### 4.3.9 Tempo de retorno do investimento ou *Payback*

Este estudo calculou o *Payback* Descontado, que leva em conta a correção monetária da TMA ao longo do tempo a fim de trazer os resultados mais próximas da realidade e, assim, mitigar o risco de erro de previsão do projeto (BRUNI; FAMÁ, 2003).

Portanto, para determinar o tempo de retorno do investimento se busca o período (ano) em que o fluxo de caixa descontado acumulado deixa de ser negativo, conforme equação (23):

$$(23) \quad \sum_{t=1}^i \frac{FC_t}{(1+TMA)^t} \geq FC_0$$

em que,

$FC_0$  é o fluxo de caixa acumulado do primeiro período, aquele em que a aplicação do capital é feita;

$FC_t$  é o fluxo de caixa acumulado no ano “t” e;

TMA é a taxa mínima de atratividade.

#### 4.3.10 Custo nivelado de eletricidade (LCOE)

O custo da eletricidade gerada por uma planta energética foi calculado utilizando a fórmula do Custo Nivelado de Eletricidade ou *Levelized Cost of Electricity* (LCOE), que compara a combinação de capital investido, custos de operação e manutenção, capacidade instalada e outras despesas variáveis em comparação com a quantidade produzida de energia.

Não leva em conta, entretanto, a depreciação de ativos, externalidades ambientais ou incertezas do futuro. Contudo, é uma boa ferramenta para comparar opções de investimento, pois traz o custo médio pela produção ( $\frac{R\$}{kWh}$ ) ao longo do tempo (NREL, 2016). Para calcular o LCOE se utilizou a equação (24),

$$(24) \quad LCOE \left[ \frac{R\$}{kWh} \right] = \frac{\left( CAPEX[R\$] \times CCF \left[ \frac{\%}{ano} \right] \right) + OP \left[ \frac{R\$}{a} \right] + MSC \left[ \frac{R\$}{a} \right]}{Energia_E \left[ \frac{kWh}{d} \right] \times 330}$$

em que,

$CAPEX_{total}[R\$]$  representa o valor do investimento em capital fixo total de R\$ 348.332,66;

$CCF \left[ \frac{\%}{a} \right]$  é o fator de amortização de capital igual a 14%;

$OP \left[ \frac{R\$}{a} \right]$  são despesas operacionais do reator;

$MSC \left[ \frac{R\$}{a} \right]$  representa as despesas com manutenção, seguro e casualidades;

$Energia_E \left[ \frac{kWh}{d} \right]$  é o montante de eletricidade exportado pelo reator à rede da concessionária, conforme fórmula (10), que é multiplicado pela quantidade de dias em operação por ano (330).

#### 4.3.11 Simulações: mínimo de lodo para rentabilidade satisfatória

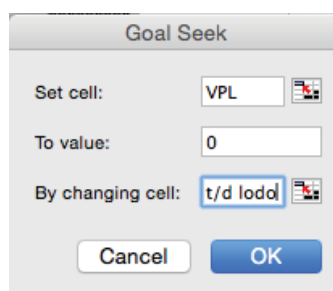
Um dos objetivos deste trabalho é determinar a partir de qual quantidade de resíduos suínos o produtor pode registrar lucro com aquisição do biodigestor de 75 kW de potência instalada em questão.

A análise dos índices de retorno econômico-financeiro foram feitas para os períodos de 5 e 10 anos após o investimento inicial. Portanto, dois novos cenários foram simulados. O S5 indica a quantidade de lodo necessária para o investimento se pagar em 5 anos. Analogamente, o S10 faz o mesmo para 10 anos.

Conforme visto, quando o  $VPL=0$  a  $TIR=TMA$  e o fluxo de caixa acumulado e descontado registra o ponto de partida para um retorno satisfatório de um investimento. Portanto, se calculou através de uma ferramenta do Excel chamada *Goal Seek*<sup>3</sup> a quantidade de lodo que correspondesse para um VPL nulo em 5 e em 10 anos.

A FIGURA 13 ilustra o comando desta ferramenta e a orientação para seu preenchimento.

FIGURA 13: FERRAMENTA DO EXCEL – GOAL SEEK



FONTE: Adaptado do Software Microsoft Excel for Mac 2011

A utilização desta ferramenta se deu da seguinte forma: no primeiro quadrante (*Set cell*:<sup>4</sup>) se estabeleceu a célula do VPL. No segundo (*To value*:<sup>5</sup>), para

<sup>3</sup> Buscar objetivo (tradução livre)

<sup>4</sup> Definir célula: (tradução livre)

<sup>5</sup> Para o valor: (tradução livre)

valor igual a zero. Por fim, no terceiro (*By changing cell*:<sup>6</sup>), se escolheu a célula da quantidade de toneladas de lodo por dia como a variável dependente da equação.

Como ambas variáveis estão conectadas por fórmulas, o resultado da ferramenta *Goal Seek*, é a quantidade de lodo que satisfaz o  $VPL=0$ . Portanto, se fez uso da ferramenta duas vezes, para o VPL de 5 e de 10 anos, resultando, assim, nos resultados da Simulação 5 Anos (S5) e Simulação 10 Anos (S10).

#### 4.3.12 Planilha avaliadora de rentabilidade

A composição da planilha de cálculo para avaliar a rentabilidade em 5 e em 10 anos de um investimento em biodigestão de resíduos suínos se deu no software *Microsoft Excel for Mac 2011* e está anexada a este trabalho em um arquivo .xlsx.

Esta calculadora utilizou a mesma base de dados e fórmulas apresentadas neste estudo. A fim de aumentar sua utilidade e operabilidade para o usuário a planilha está dividida apenas entre input (azul) e output (verde).

Ela conta com três abas, sendo a primeira um manual de utilização para o usuário, a segunda o campo onde se registra as condições da planta e coleta os resultados e, por fim, a terceira onde é possível ver a amortização do financiamento bancário do projeto.

O usuário deve apenas preencher as células azuis, que são configuráveis. Desta forma, o usuário poderá configurar a planilha de acordo com suas condições e especificidades produtivas. Se sugere, primeiramente, a alteração da quantidade de lodo disponível (célula D5) para diversos valores, a fim de observar os resultados financeiros (células J4:Q22).

#### 4.4 CONDIÇÕES TÍPICAS DE OPERAÇÃO DE UM BIODIGESTOR PARA SUINOCULTURA

O QUADRO 12 ilustra os parâmetros e variáveis constantes utilizadas para rodar a modelagem do cálculo de viabilidade econômica dos quatro cenários para o reator pré-estabelecido.

---

<sup>6</sup> Alterando célula: (tradução livre)

QUADRO 11: VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS

| Parâmetro  | Unidade                  | Valor  |
|--|--------------------------|--------|
| Temperatura ambiente                               | °C                       | 20     |
| Temperatura lodo                                   | °C                       | 20     |
| Temperatura Reator                                 | °C                       | 40     |
| Tempo de Retenção <sup>1</sup>                     | d                        | 30     |
| Tempo Morto <sup>2</sup>                           | d                        | 4      |
| Demanda de mão-de-obra <sup>3</sup>                | $\frac{h}{d}$            | 4      |
| Preço de mão-de-obra                               | $\frac{R\$}{h}$          | 10,42  |
| Consumo de energia elétrica do reator <sup>4</sup> | $\frac{kWh}{d}$          | 40     |
| Tarifa Energia Elétrica <sup>5</sup>               | $\frac{R\$}{kWh}$        | 0,5383 |
| ICMS <sup>6</sup>                                  | %                        | 0      |
| Tarifa Gás Natural <sup>7</sup>                    | $\frac{R\$}{m^3}$        | 2,26   |
| Potencial Calorífico CH <sub>4</sub> <sup>8</sup>  | $\frac{kWh}{m^3}$        | 9,97   |
| Potencial Calorífico GN <sup>9</sup>               | $\frac{kWh}{m^3}$        | 11,1   |
| Eficiência gerador elétrico <sup>10</sup>          | %                        | 37     |
| Eficiência trocador de calor <sup>11</sup>         | %                        | 45     |
| Calor específico lodo <sup>12</sup>                | $\frac{kJ}{kg \times C}$ | 4,18   |
| TMA  | %                        | 10,8   |
| Fator produção ótima                               | %                        | 80,6   |
| Tempo retorno 1                                    | a                        | 5      |
| Tempo retorno 2                                    | a                        | 10     |
| Constantes para rodagem do modelo <sup>13</sup> :  |                          |        |
| K1   |                          | 0,2    |
| K4   | -                        | 0,49   |
| K5   | -                        | 0,07   |
| K6   | -                        | 23,81  |
| K7   | -                        | 0,0023 |
| K8   | -                        | 0,32   |
| K9   | -                        | 0,39   |
| K10  | -                        | 0,13   |
| K11  | -                        | 0,2778 |
| K12  | %                        | 30     |

FONTE: Adaptado de (APPELS et al., 2008)<sup>1,2</sup>, (AL SAEDI et al., 2008)<sup>8,9,12</sup>, (WU et al., 2016)<sup>3,4</sup>, (BOLZONELLA et al., 2005)<sup>13</sup>, (COPEL, 2017)<sup>5</sup>, (COMPAGÁS, 2017)<sup>7</sup>, (PARANÁ, 2018)<sup>6</sup> e (BIOKÖHLER, 2017)<sup>10,11</sup>

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho já justificou a importância da técnica de biodigestão e metodologicamente assumiu as condições e equipamentos necessários para que um certo reator tenha uma ótima performance e para que o investidor registre o melhor retorno possível. Este retorno medido em montante nominal (VPL), percentagem (TIR) e tempo (PB) é muito importante para a tomada de decisão do investidor.

### 5.1 VOLUME PRODUÇÃO ÓTIMA DE METANO

O QUADRO 13 apresenta os resultados por cenário e o cálculo da estimativa de produção ótima de metano de acordo com as características do reator.

QUADRO 12: RESULTADO DO VOLUME DE PRODUÇÃO ÓTIMA DE METANO

| EQ  | DESCRIÇÃO   | UN.                           | C1     | C2     | C3     | C4     |
|-----|---|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| (2) | Biogás <sub>potencial</sub>   | $\left[\frac{m^3}{d}\right]$  | 480    | 720    | 960    | 1.200  |
| (3) | $CH_{4_{potencial}}$  | $\left[\frac{m^3}{d}\right]$  | 312    | 468    | 624    | 780    |
| (4) | B   | índice                        | 1,11   |        |        |        |
| (5) | $Eficiência_{tratamento}$   | [%]                           | 85%    |        |        |        |
| (6) | $Eficiência_{tratamento_{50\% TR}}$                                 | [%]                           | 71     |        |        |        |
| (7) | $Eficiência_{tratamento_{200\% TR}}$                                | [%]                           | 93     |        |        |        |
| (8) | $Fator_{produção_{ótima}}$  | [%]                           | 81     |        |        |        |
| (9) | $Produção_{biogás}$   | $\left[\frac{L}{g SV}\right]$ | 0,32   |        |        |        |
| (1) | Volume de produção ótima $CH_4$                                     | $\left[\frac{m^3}{d}\right]$  | 251,45 | 377,18 | 502,90 | 628,63 |
|     | Diferença entre $CH_{4_{potencial}}$ (3) e $CH_{4_{ótima}}$ [%] (1) | [%]                           | -19    | -19    | -19    | -19    |

FONTE: Elaborado pelo autor

É possível observar que:

- i.o volume de  $Produção_{biogás}$  (9) e  $CH_{4potencial}$  (3) crescem de forma diretamente proporcional ao montante de resíduo de cada cenário;
- ii.apesar do índice de ajuste da temperatura representado por B (4) aumentar a produção de biogás em 11%, o ajuste de tempo de retenção (5) e da cinética do reator (6,7) diminuem o fator de ajuste e resultam em uma eficiência de 81% na produção de metano (8), de acordo com as características do reator e do substrato;
- iii.levando em conta a eficiência de 81% e as conversões de unidades devidas (9) é possível concluir que a produção de biogás está dentro do intervalo encontrado na literatura conforme QUADRO 14;
- iv.a utilização deste método de ajuste para cálculo de viabilidade econômica em projetos de biogás é importante, pois corrigiu a produção de metano e, conseqüentemente, a arrecadação do projeto em 19% negativo.

O resultado (9) indica a conversão da produção de biogás para  $\left[\frac{L}{g\ SV}\right]$ . O intuito foi comparar com parâmetros encontrados na literatura, conforme QUADRO 14.

Ao comparar, é possível notar que o resultado da modelo que calculou a geração efetiva de biogás está dentro do intervalo determinado pelo resultado de pesquisas consideradas referências no tema, já que o valor do Presente Trabalho de 0,32 é menor do que 0,6 e maior do que 0,3  $\left[\frac{L}{g\ SV}\right]$ .

QUADRO 13: COMPARAÇÃO PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM AJUSTE DAS CONDIÇÕES DO REATOR

| REFERÊNCIA               | Produção Biogás (L / g SV) |
|--------------------------|----------------------------|
| OLIVEIRA, 1993           | 0,3 - 0,6                  |
| AL SAEDI et al., 2008    | 0,4                        |
| <b>Presente Trabalho</b> | <b>0,32</b>                |
| CHAN et al., 2016        | 0,3                        |

FONTE: (OLIVEIRA, 1993), (AL SAEDI et al., 2008) e (CHAN et al., 2016)

Desta forma, os ajustes escolhidos para estimar a produção de metano dado o perfil do reator, trouxeram resultados próximos aos obtidos em outras pesquisas, o

que valida o método de cálculo utilizado neste trabalho para outros projetos de viabilidade de biodigestão com aproveitamento energético na suinocultura.

## 5.2 BIOFERTILIZANTE

A digestão anaeróbica (DA) é um sistema fechado em que o insumo é resíduo dos animais e o produto é o gás somado ao biofertilizante. Dado sua composição rica em organominerais (nitrogênio, potássio e fósforo) este é considerado uma boa alternativa à fertilizantes químicos.

Contudo, dada dificuldade de controle da concentração de seus nutrientes, ainda não se considera possível substituir integralmente os adubos químicos em uma lavoura de capital intensiva e por isso este trabalho não atribuirá monetização a este subproduto.

De qualquer forma, é um volumoso resíduo e deve ser quantificado a fim de dimensionar seu tanque de retenção e organizar sua aplicação ao solo - condição necessária para cumprimento do tratamento biológico.

O QUADRO 15 ilustra o volume de biofertilizante produzido para cada cenário.

QUADRO 14: VOLUME PRODUZIDO DE BIOFERTILIZANTE POR CENÁRIO

| EQ   | DESCRIÇÃO                | UN.                           | C1       | C2   | C3   | C4    |
|------|--------------------------|-------------------------------|----------|------|------|-------|
|      | $Q_{lodo}$               | $\left[\frac{Mg}{d}\right]$   | 20       | 30   | 40   | 50    |
| (2)  | $Biogás_{potencial}$     | $\left[\frac{m^3}{d}\right]$  | 480      | 720  | 960  | 1.200 |
|      | $\rho_{biogás}$          | $\left[\frac{Mg}{m^3}\right]$ | 0,00122  |      |      |       |
|      | $\rho_{biofertilizante}$ | $\left[\frac{Mg}{m^3}\right]$ | 1.010,32 |      |      |       |
| (15) | $Biofertilizante$        | $\left[\frac{m^3}{d}\right]$  | 19,2     | 28,8 | 38,4 | 48,0  |

FONTE: Adaptado de (AL SAEDI et al., 2006), (KUNZ; OLIVEIRA, 2006)

Ao analisar o volume produzido de biofertilizante é possível identificar sua proximidade com o volume do resíduo afluente no reator para sofrer a fermentação. Isso se dá, pois, o biodigestor é um ciclo fechado, do qual se dá um tratamento e fim diferenciado apenas para o gás. Todo o restante é considerado como biofertilizante



e direcionado para a lagoa aberta, onde aguardará destinação ao solo da propriedade.

### 5.3 CERTIFICADOS DE REDUÇÃO EMISSÕES DE CARBONO (CRE)

Diversos países já possuem o sistema de comercialização destes Certificados de Redução de Emissões (CRE), também chamados de “créditos de carbono” e os negociam a preços que variam de 1 (um) a 139 dólares americanos (USD) por tCO<sub>2</sub>e.

Cada tCO<sub>2</sub>e dá direito à emissão de um CRE. Na média dos países que possuem sistemas de comercialização, 46% negociam a menos de USD 10. O Brasil, no entanto, ainda não possui um sistema de corretagem e negociação de CRE ou sequer possui previsão para sua instalação ou início de operação (BANCO MUNDIAL; ECOFYS, 2018).

Portanto, este trabalho não imputará a venda destes CRE na previsão de receita do projeto. Todavia, se expõe a quantidade de potenciais CRE que poderiam ser emitidos por cenário, pois é um indicador que registra uma diminuição de poluição atmosférica e que pode ser rentável no futuro.

O QUADRO 16 ilustra o cálculo da quantidade de tCO<sub>2</sub>e e, consequentemente, do número de CRE para potencial emissão.

QUADRO 15: POTENCIAL DE EMISSÃO DE CERTIFICADO DE REDUÇÃO DE EMISSÕES POR CENÁRIO

| EQ   | DESCRIÇÃO             | UN.                           | C1     | C2     | C3     | C4     |
|------|-----------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| (1)  | $CH_{4\acute{o}timo}$ | $\left[\frac{m^3}{d}\right]$  | 251,45 | 377,18 | 502,90 | 628,63 |
|      | $\rho_{CH_4}$         | $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ | 0,72   |        |        |        |
|      | $VPAG_{CH_4}$         | -                             | 28     |        |        |        |
| (16) | $tCO_2e$              | $\left[\frac{t}{d}\right]$    | 5      | 8      | 10     | 13     |

FONTE: Adaptado de (MYHRE, 2013) e (AL SAEDI et al., 2008)

Observa-se que a quantidade de potenciais CRE é significativa para todos os cenários.

Com a estimativa na média do mercado de venda de um CRE por 5 USD seria possível auferir uma receita bruta (sem contar despesas com auditoria e burocracia) de 25 USD por dia ou 8.250 USD por ano no Cenário 1, o menor de todos. Para o Cenário 4, por exemplo, esta receita extra montaria 21.450 USD por ano.

#### 5.4 CONVERSÃO ENERGÉTICA

Os resultados obtidos com as conversões de energia a fim de estimar a geração de receita são ilustrados na TABELA 1, que traz os resultados da conversão do poder calorífico do biogás para o meio pecuniário (R\$).

TABELA 2: RESULTADOS CONVERSÃO ENERGÉTICA

| EQ   | DESCRIÇÃO       | UN.                          | C1             | C2             | C3             | C4             |
|------|-----------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| (10) | $Energia_E$     | $\left[\frac{kWh}{d}\right]$ | 887,58         | 1.351,37       | 1.815,16       | 2.278,95       |
| (11) | $Energia_T$     | $\left[\frac{kWh}{d}\right]$ | 524,31         | 786,47         | 1.048,62       | 1.310,78       |
| (12) | $Con_T$         | $\left[\frac{kWh}{d}\right]$ | 603,83         | 905,74         | 1.207,65       | 1.509,57       |
| (13) | $Receita_{EXP}$ | $\left[\frac{R\$}{d}\right]$ | 477,76         | 727,40         | 977,05         | 1.226,69       |
| (17) | <b>ROL</b>      | $\left[\frac{R\$}{a}\right]$ | <b>157.659</b> | <b>240.042</b> | <b>322.424</b> | <b>404.807</b> |

FONTE: Elaborado pelo autor

Ao analisa-la é possível perceber que:

- i.a quantidade de energia elétrica e térmica produzida pelo reator (10,11) são diretamente proporcionais ao volume de lodo digerido
- ii.o reator consome mais da metade da energia térmica produzida, o que ratifica a importância da instalação de um trocador de calor no biodigestor a fim de não haver gastos com seu aquecimento
- iii.se nota, ainda, que a economia com o aproveitamento da energia térmica através do trocador de calor é equivalente a 40% da receita com a eletricidade exportada para a concessionária de energia, dado a elevada

temperatura que deve ser mantida constante e ao custo do gás natural para o aquecimento

iv.o valor da ROL é expressivo em todos os cenários e por ser acumulativo até 60 meses representa ganho financeiro direto para o investidor.

## 5.5 FLUXO DE CAIXA

O QUADRO 17 exemplifica o cálculo do resultado líquido da projeção do segundo ano ( $n=2$ ) de funcionamento do biodigestor. A justificativa na escolha deste período baseia-se no fato de que a receita do primeiro ano é estimada pela metade, frente à esperança de dificuldades durante o início de operação (BIO TECH, 2008). Além disso, para manter uma expectativa conservadora, já que no segundo ano é cobrada a maior parcela de toda a amortização do financiamento, no valor de R\$ 70.756,86, conforme amortização da dívida bancária, que se encontra no Apêndice 1 Fluxos de Caixa e Amortização da Dívida Bancária.

QUADRO 16: CUSTOS E DESPESAS NO ANO 2

| EQ                             | DESCRIÇÃO                              | UNIDADE                        | VALOR             |
|--------------------------------|--|--------------------------------|-------------------|
|                                | <i>Depreciação<sub>maq</sub></i>       | $\left[ \frac{R\$}{a} \right]$ | 6.314,98          |
|                                | <i>Depreciação<sub>CHP</sub></i>       |                                | 15.500,00         |
|                                | <i>Depreciação<sub>fer</sub></i>       |                                | 4.614,65          |
| (18)                           | <i>Depreciação<sub>total</sub></i>     | $\left[ \frac{R\$}{a} \right]$ | 26.429,63         |
| (19)                           | Despesa operacional (OP <sub>1</sub> ) | $\frac{R\$}{a}$                | 13.750,00         |
| (20)                           | MSC                                    | $\frac{R\$}{a}$                | 20.889,96         |
|                                | Amortização Dívida Bancária no ano 2   | [R\$]                          | 70.756,86         |
| <b>(18+19+20+ Amortização)</b> | <b>Total de despesas</b>               | <b>[R\$]</b>                   | <b>131.836,45</b> |

FONTE: Elaborado pelo autor

Se demonstra com esses resultados a expressividade do pagamento da dívida bancária, que, excedeu a soma das despesas de depreciação, MSC e de operação. Se nota, também, a importância da conta de depreciação, que é inflada pelo montante pago pelo grupo gerador de energia do projeto (*Depreciação<sub>CHP</sub>*), que

é cerca de 3 vezes maior do que a depreciação dos equipamentos do maquinário e do fermentador.

Por outro lado, se ilustra a baixa despesa operacional, representada pela fórmula (19), dado a baixa demanda por mão-de-obra e distinta automatização do processo.

A TABELA 2 demonstra a margem de lucro, também chamada de lucratividade, de cada cenário ao dividir o resultado líquido (21) pela Receita Operacional Líquida (ROL) (17).

TABELA 3: MARGEM DE LUCRO ANO 2

| EQ   | DESCRIÇÃO                      | UN.             | C1         | C2         | C3         | C4         |
|------|--------------------------------|-----------------|------------|------------|------------|------------|
| (17) | ROL                            | $\frac{R\$}{a}$ | 157.659,90 | 240.042,44 | 322.424,97 | 404.807,51 |
| (21) | <i>Resultado<sub>liq</sub></i> | [R\$]           | 25.410,95  | 107.793,48 | 190.176,02 | 272.558,55 |
|      | <b>Lucratividade</b>           | <b>[%]</b>      | <b>16%</b> | <b>45%</b> | <b>59%</b> | <b>67%</b> |

FONTE: Elaborado pelo autor

O Resultado líquido do segundo ano de operação é positivo para todos os cenários, o que demonstra a lucratividade nominal do projeto em mais de dois dígitos. Por exemplo, para o C1, com  $20 \frac{ton}{dia}$  de lodo, a margem de lucro é de 16% - resultado da divisão do resultado líquido (R\$ 25.410) com a ROL correspondente (R\$ 157.659). A margem de lucro do C2 é quase três vezes maior e registrou 45% (R\$ 107.793 dividido por R\$ 240.042).

Para o C3 - que conta com o dobro da quantidade de lodo em comparação com o C1 - registrou lucratividade de 59%, ou seja, é 3,7 vezes mais lucrativo, demonstrando, assim, a vantagem da economia de escala.

## 5.6 CUSTO NIVELADO DE ENERGIA (LCOE)

Ao vislumbrar os valores calculados para o LCOE dos resultados para os quatro cenários foi possível apreciar o poder da economia de escala, de forma que o custo de energia gerado decresce na medida em que o volume de produção aumenta. Além disso, se vê como a energia gerada tem um preço muito reduzido com o cobrado pela concessionária de energia no Paraná (R\$ 0,538 por kWh), por

exemplo, em comparação com todos os cenários. Ainda, se observou, que a média do LCOE para os quatro cenários é igual a  $0,18 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}}$ , conforme QUADRO 18.

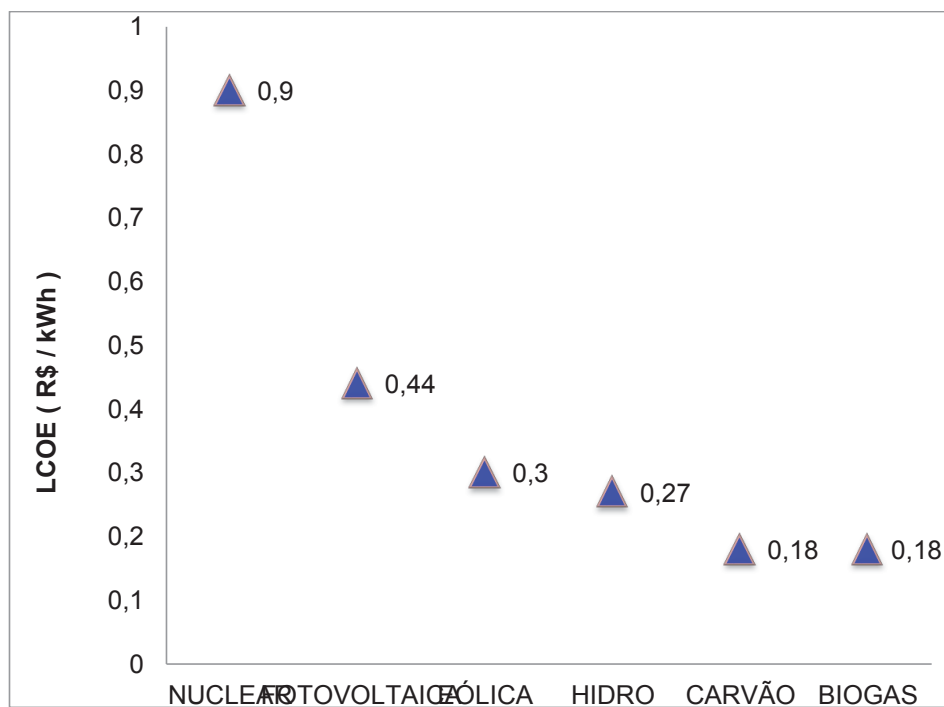
QUADRO 17: CÁLCULO DO LCOE PARA OS CENÁRIOS

| EQ   | DESCRIÇÃO   | UN.                             | C1          | C2          | C3          | C4          |
|------|-------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|      | CAPEX       | [R\$]                           | 348.332,66  | 348.332,66  | 348.332,66  | 348.332,66  |
|      | CCF         | $\frac{\%}{a}$                  | 14          | 14          | 14          | 14          |
| (19) | OP          | $\frac{\text{R\$}}{a}$          | 13.750,00   | 13.750,00   | 13.750,00   | 13.750,00   |
| (20) | MSC         | $\frac{\text{R\$}}{a}$          | 20.889,96   | 20.889,96   | 20.889,96   | 20.889,96   |
| (10) | $Energia_E$ | $\frac{kWh}{d}$                 | 887,58      | 1.351,37    | 1.815,16    | 2.278,95    |
| (24) | LCOE        | $\frac{\text{R\$}}{\text{kWh}}$ | <b>0,28</b> | <b>0,19</b> | <b>0,14</b> | <b>0,11</b> |

FONTE: Elaborado pelo autor

Para efeito de comparação se utilizou um estudo do Instituto Fraunhofer para Sistemas Energéticos Solares sobre o custo da geração de energias renováveis (FRAUNHOFER ISE, 2013), no qual se calculou o LCOE mínimo, máximo e médio para diversas fontes de energia renovável. Entre elas a solar, eólica terrestre e carvão, que estão ilustradas na FIGURA 14. Adicionalmente aos resultados deste instituto, se incluiu o LCOE da planta de biogás calculado neste trabalho (24).

FIGURA 14: GRÁFICO DO LCOE PARA DIFERENTES FONTES DE ENERGIA



FONTE: Adaptado de (FRAUNHOFER ISE, 2013), (EIA, 2017)

A comparação evidencia o baixo custo por energia gerada para a opção do biogás na suinocultura, a qual na média equivale à usina de carvão em  $0,18 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}}$ . Por ser considerada uma atividade complementar do proprietário, os resíduos dos suínos não oneram a planta com despesas variáveis, o que pressiona o LCOE para baixo. Ao contrário, da usina de carvão, por exemplo, que precisa constantemente adquirir no mercado o material mineral para a combustão.

Paralelamente, as usinas solar e eólica contam com custos variáveis apenas de manutenção, pois também não possuem custo com aquisição de matéria-prima combustível para a operação, contudo se destacam com elevados níveis de LCOE. Isso se dá devido ao elevado preço dos equipamentos e técnica de instalação.

## 5.7 VIABILIDADE ECONÔMICA DOS CENÁRIOS

O cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR) representa a taxa de rendimento de um fluxo de caixa em determinado intervalo de tempo. Este rendimento pode ser positivo ou negativo. Se o retorno for negativo, é possível interpretar que os fluxos de caixas positivos não cobriram o investimento inicial descontado ao longo do tempo. Se o retorno for positivo, as entradas superaram as saídas de caixa, descontadas no tempo.

A interpretação da TIR só faz sentido ao ser comparada com a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Esta taxa é escolhida pelo investidor como parâmetro de correção monetária para o cálculo de viabilidade econômica e representa a rentabilidade mínima satisfatória.

Caso a  $TIR > TMA$ , o investidor está inclinado a seguir com o investimento. Caso a  $TMA > TIR$ , o projeto não demonstra ser lucrativo o suficiente.

O espaço de tempo preciso para que o investidor recupere o capital aplicado em um projeto é chamado de *Payback* (PB). Sua base de cálculo é o fluxo de caixa acumulado descontado, o qual, ao se tornar positivo, indica que a soma das entradas de caixa (receitas) superou as saídas (custos e despesas), corrigidas monetariamente ao longo do tempo. O ano em que esta inversão (de negativo para positivo) acontece resulta no PB (FONSECA, 2012).

A TIR, o VPL e o PB dos 4 cenários e das duas simulações foram calculados expostos na TABELA 3.

TABELA 4: RESULTADO DOS 4 CENÁRIOS E 2 SIMULAÇÕES

| -          | INPUT<br>[t/d] | TIR 5<br>ANOS | VPL 5<br>ANOS | TIR 10<br>ANOS | VPL 10<br>ANOS | PAYBACK<br>[a / m] | EQUIVALENTE<br>EM ANIMAIS |
|------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|--------------------|---------------------------|
| <b>C1</b>  | 20             | -36%          | -324.022,39   | -5%            | -226.598,74    | -                  | 3.900                     |
| <b>S10</b> | 24,52          | -14%          | -189.273,33   | 10,8%          | 0              | 10 / 0             | 4.780                     |
| <b>C2</b>  | 30             | 8%            | -26.148,54    | 27%            | 274.316,38     | 5 / 4              | 5.850                     |
| <b>S5</b>  | 30,88          | 10,8%         | 0             | 30%            | 318.288,68     | 5 / 0              | 6.020                     |
| <b>C3</b>  | 40             | 45%           | 271.725,31    | 58%            | 775.231,49     | 3 / 0              | 7.800                     |
| <b>C4</b>  | 50             | 87%           | 569.599,16    | 95%            | 1.276.146,60   | 2 / 2              | 9.750                     |

FONTE: Elaborado pelo autor

É possível verificar que o C1 é inviável para os dois períodos de 5 e 10 anos, pois a TIR e o VPL são em ambos abaixo de zero e o PB não pode sequer ser calculado, pois não se identificou fluxo de caixa acumulado descontado positivo.

Sendo assim, para este volume de lodo, um biodigestor menor, mais barato - com menor capacidade instalada de geração energética - deve ser projetado.

O C2 também foi considerado inviável para 5 anos, pois a TIR não atingiu o valor da TMA, porém registrou lucratividade satisfatória no período de 10 anos, no qual registrou TIR = 27% (maior que a TMA), VPL de R\$ 274 mil e PB em 5 anos e 4 meses.

Os cenários C3 e C4 com capacidade de geração de resíduos de  $40 \frac{t}{d}$  e  $50 \frac{t}{d}$ , respectivamente, mostram o poder da economia de escala e registram atrativas expectativas de retorno financeiro.

O C3 em 5 anos registrou VPL de aproximadamente R\$ 271 mil e em 10 anos, de R\$ 775 mil. O C4 conta com 25% a mais de resíduos que o C3. Contudo seu retorno é mais do que o dobro: VPL de aproximadamente R\$ 569 mil para 5 anos e R\$ 1,3 milhão para 10 anos. A TIR do C3 é de 45% em 5 anos e de 58% para 10 anos. O C4, por sua vez, registra distinta TIR de 87% e 95%, respectivamente. Por fim, o tempo de retorno do investimento (PB) do C3 é de precisamente 3 anos enquanto do C4 é apenas 2 anos e 2 meses.

Os cenários S5 e S10 foram manipulados a fim de indicar qual a quantidade mínima de resíduos necessária para a viabilidade de tal investimento no espaço de tempo de 5 e 10 anos. Para ser considerado minimamente viável o VPL deve ser igual a zero – o que significa que as receitas cobriram os custos e a TMA escolhida.

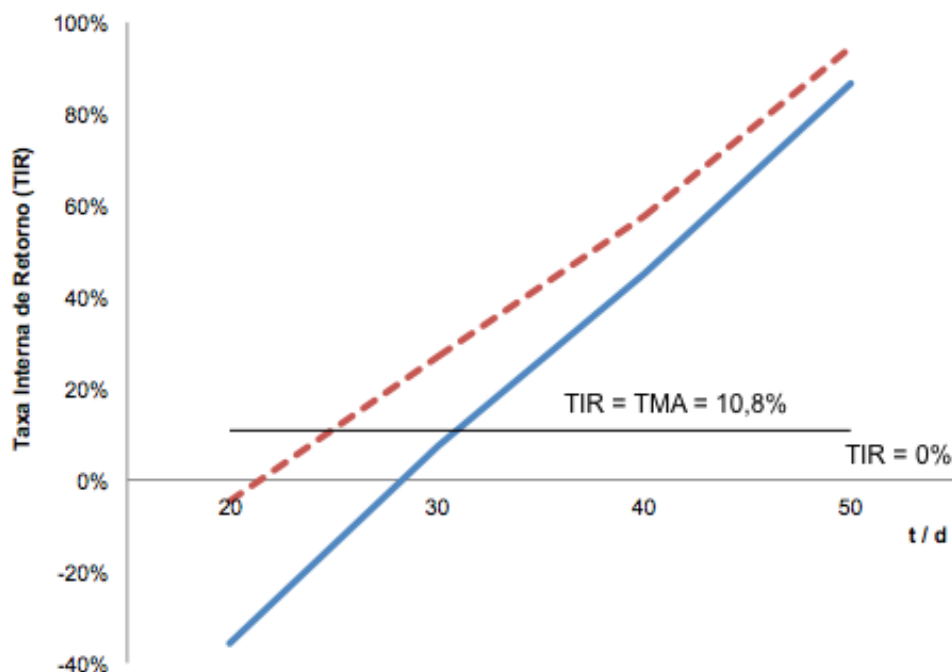
Pode-se concluir que em uma fazenda que dispõe de aproximadamente 24,5 toneladas de lodo por dia já é possível registrar retorno financeiro positivo e aceitável a partir de 10 anos de operação. Por ter sido manipulado, o S10 registrou no período de 10 anos TIR exatamente igual a TMA de 10,8%, VPL = 0 e PB em precisamente 10 anos e 0 meses.

Paralelamente, o S5 com 30,9 toneladas de lodo por dia montou em 5 anos TIR igual a TMA de 10,8%, VPL = 0 e PB em 5 anos e 0 meses. Adicionalmente, para o S5, é possível vislumbrar uma atrativa TIR de 30% e VPL maior que R\$ 300 mil no décimo ano.

A FIGURA 15 e FIGURA 16 ilustram, respectivamente, as curvas da TIR e do VPL para todos os cenários, simulações e períodos avaliados.



FIGURA 15: SIMULAÇÃO DA TAXA INTERNA DE RETORNO DOS CENÁRIOS



FONTE: Elaborado pelo autor

Ao analisar as FIGURAS 15 e 16 pode-se facilmente observar que quanto maior a quantidade de resíduos produzido, mais elevado é o volume disponível de metano para combustão e, assim, maior o retorno financeiro para o projeto.

Nota-se, ainda, a corroboração da influência da economia de escala, a qual explica como uma variação na quantidade de resíduos a partir de certo ponto resulta em uma variação de lucro marginal maior que a nominal.

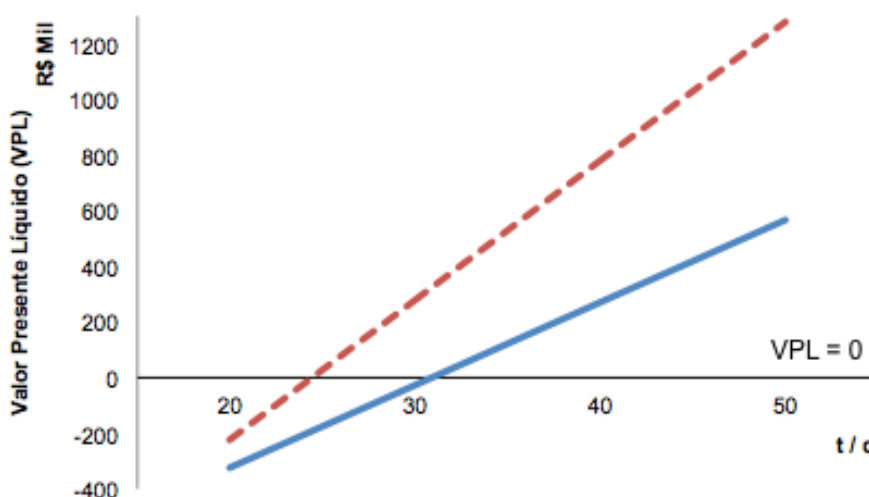
Na FIGURA 15 é possível ver que apenas a partir de  $24,52 \frac{t}{d}$  a curva TIR 10 ANOS (pontilhada vermelha) ultrapassa a TMA de 10,8% (constante preta) e que para a curva TIR 5 ANOS (sólida azul) é preciso mínimo de  $30,88 \frac{t}{d}$  para registrar um retorno aceitável.

Paralelamente, a FIGURA 16 exibirá as curvas do VPL para os mesmos cenários, simulações e períodos avaliados.

Se  $VPL > 0$ , o investimento se mostra lucrativo e a TIR é maior que a TMA. Se  $VPL < 0$ , o investimento não é promissor e resultará em prejuízo, com uma taxa de retorno não satisfatória. Se  $VPL = 0$ , o resultado líquido é nulo (tampouco lucro

ou prejuízo) e o investimento tem uma taxa de retorno precisamente igual à TMA escolhida.

FIGURA 16: SIMULAÇÃO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO DOS CENÁRIOS



FONTE: Elaborado pelo autor

A FIGURA 16 mostra que as curvas de 5 e 10 anos passam para valores satisfatórios também a partir de 24,52 ( $S_{10}$ ) e 30,88  $\frac{t}{d}$  ( $S_5$ ).

O VPL positivo em 5 anos ocorre a partir de 30,88  $\frac{t}{d}$  de lodo ( $S_5$ ) e pode atingir R\$ 569 mil em uma propriedade com cerca de 50  $\frac{t}{d}$  de resíduos ( $C_4$ ). Já o VPL positivo em 10 anos ocorre a partir de 24,52  $\frac{t}{d}$  ( $S_{10}$ ), e atinge aproximadamente R\$ 775 em uma propriedade com cerca de 7,8 mil animais ( $C_3 = 40 \frac{t}{d}$ ) e R\$ 1,3 milhão para uma de 9,7 mil animais ( $C_4 = 50 \frac{t}{d}$ ).

## 5.8 INVESTIMENTO POTENCIAL / PÚBLICO ALVO

Em uma pesquisa pioneira do setor de biogás da EMBRAPA, se estimou uma média de 5 litros de lodo por dia e por suíno em uma granja de ciclo completo (OLIVEIRA, 1993). Ao converter a massa para o volume, em vista da densidade

estimada do lodo de  $1,026 \frac{t}{m^3}$  e dividir pela quantidade de resíduos simulada, se chega aos resultados do número equivalente de animais em função da quantidade de lodo disponível, ilustrado na última coluna da TABELA 3. Nela, é possível ver que para o S10 e S5 o mínimo equivalente de animais é de aproximadamente 4.780 e 6.020, respectivamente.

Em um recente relatório da indústria suinícola do Brasil consta o mapa do porte dos produtores no território nacional (SEBRAE;ABCS, 2016). Nele é possível analisar por estado brasileiro qual o porte médio das granjas e suas quantidades de matrizes. Ao levar em conta que uma matriz representa, em média, dez animais no ciclo completo de uma granja (EMBRAPA, 1998), se torna possível estimar o volume de potenciais investidores entre os produtores suinícolas brasileiros em função do número de animais, conforme demonstrado pela TABELA 4.

TABELA 5: DISTRIBUIÇÃO DAS GRANJAS POR PORTE NO BRASIL

| FAIXA    | QTD. DE ANIMAIS         | NÚMERO DE GRANJAS | PROPORÇÃO   |
|----------|-------------------------|-------------------|-------------|
| 1        | 0 - 2.000               | 677               | 22%         |
| 2        | 2.010 - 3.000           | 431               | 14%         |
| 3        | 3.010 - 5.000           | 706               | 23%         |
| <b>4</b> | <b>5.010 - 10.000</b>   | <b>630</b>        | <b>20%</b>  |
| 5        | 10.010 - 20.000         | 408               | 13%         |
| 6        | 20.010 - 30.000         | 148               | 5%          |
| 7        | 30.010 - X              | 91                | 3%          |
| -        | <b>TOTAL DE GRANJAS</b> | <b>3.091</b>      | <b>100%</b> |
| -        | <b>TOTAL DE ANIMAIS</b> | <b>15.972.430</b> | <b>100%</b> |
|          | <b>MÉDIA ANIMAIS</b>    | <b>5.167,4</b>    |             |

FONTE: Adaptado de (SEBRAE;ABCS, 2016)

Os Cenários C1, C2, C3, C4, S5 e S10 se encontram entre as Faixas 3 e 4, que juntas representam 43% da indústria suinícola brasileira. Se observa, ainda, que 36% das granjas brasileiras são de pequeno porte (até 3.000 animais), 43% médio (até 10.000 animais) e 21% de grande porte (acima de 10.000).

O biodigestor proposto foi orçado para produtores de médio porte e requer o lodo de aproximadamente 4.800 animais a fim de ser lucrativo em 10 anos e de 6.000 animais para 10 anos. Assim, ele é indicado para os produtores da Faixa 4, que representam 20% da indústria nacional.

O porte dos produtores varia na região Sul, onde está o cluster suinícola brasileiro, conforme QUADRO 19.

TABELA 6: DISTRIBUIÇÃO DAS GRANJAS POR PORTE NOS ESTADOS DA REGIÃO SUL

| FAIXA            | QTD. DE ANIMAIS | PARANÁ    |        | RIO GRANDE DO SUL |        | SANTA CATARINA |        |
|------------------|-----------------|-----------|--------|-------------------|--------|----------------|--------|
|                  |                 | GRANJAS   | MARGEM | GRANJAS           | MARGEM | GRANJAS        | MARGEM |
| 1                | 0-2.000         | 104       | 18%    | 26                | 4%     | 201            | 20%    |
| 2                | 2.010-3.000     | 113       | 19%    | 55                | 9%     | 201            | 20%    |
| 3                | 3.010-5.000     | 163       | 28%    | 153               | 24%    | 276            | 27%    |
| 4                | 5.010-10.000    | 122       | 21%    | 163               | 26%    | 223            | 22%    |
| 5                | 10.010-20.000   | 61        | 10%    | 185               | 29%    | 65             | 6%     |
| 6                | 20.010-30.000   | 13        | 2%     | 33                | 5%     | 33             | 3%     |
| 7                | 30.010 - X      | 15        | 3%     | 20                | 3%     | 13             | 1%     |
| TOTAL DE GRANJAS |                 | 591       | 19%    | 635               | 21%    | 1.012          | 33%    |
| TOTAL DE ANIMAIS |                 | 1.413.890 | 9%     | 3.404.160         | 21%    | 4.204.880      | 26%    |

FONTE: Adaptado de (SEBRAE;ABCS, 2016)

Ao vislumbrar a comparação entre os estados do Paraná (PR), Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC) se observa a importância da região para a indústria de suínos brasileira. Juntos, possuem 56% de todos os suínos do Brasil e 73% das granjas. Apenas em SC se concentram um terço de todas as granjas e um quarto de todos os suínos do Brasil.

Se nota, também, que na média o PR e SC possuem a maior parte dos produtores na Faixa 3 e o RS na Faixa 5.

Separando por Estados, o PR possui na média potenciais 122 granjas adequadas para investimento neste projeto ou 21% das propriedades, enquanto SC e RS, contam com investidores potenciais em 163 ou 26% e 223 ou 22% das propriedades, respectivamente.

## 5.9 PLANILHA AVALIADORA DE RENTABILIDADE

A modelagem financeira apresentada no Presente Trabalho é formada por parâmetros, variáveis e fórmulas algébricas de conversão, que juntos se assemelham a um algoritmo. Este algoritmo responde o usuário de forma a registrar resultados específicos (output), com base nas condições pré-estabelecidas dadas (input).

A planilha avaliadora de rentabilidade possui este algoritmo programado em um arquivo em excel anexado ao arquivo texto.

Ela é dividida em três abas:

- i) a primeira aba contém as instruções para facilitar o entendimento da operação do usuário, ilustrada pela FIGURA 17.
- ii) A segunda aba é o campo de operação, que por sua vez é dividido em duas partes, a azul (input) e a verde (output). É aqui onde o usuário registra as condições do reator e coleta os resultados. A parte de input é ilustrada pela FIGURA 18 e a de output pela FIGURA 19.
- iii) A terceira aba ilustra a projeção de pagamento das parcelas e juros do financiamento escolhida pelo usuário, representada pela FIGURA 20.

FIGURA 17: ABA 1 – INSTRUÇÕES DA PLANILHA AVALIADORA DE RENTABILIDADE

**BEM VINDO À PLANILHA AVALIADORA DE RENTABILIDADE DE BIODIGESTORES PARA DEJETOS SUÍNOS!**

Abaixo as instruções para operação desta ferramenta:

**1) Abas**

**INPUT e OUTPUT** = input das condições e parâmetros (azul e amarelo) e output dos resultados (verde)

**Financiamento** = Cronograma de amortização da dívida bancária

**2) INPUT E OUTPUT**

Clique na célula **D5** em **amarelo** e utilize o botão (↕) para escolher um dos montantes estudados na Dissertação (C1, C2, C4, C4, S5 ou S10)

As células em **azul claro** são configuráveis a fim de adaptar para outros projetos. Algumas contam com uma barra para alteração do valor. Basta clicar, arrastar e soltar o botão. Se quiser, pode digitar o valor também!

Os comentários ou explicações sobre os itens são indicados pelo triângulo **vermelho** na célula. Para acessar, basta clicar na célula com o triângulo ou passar a seta do mouse por cima.

Na seção de resultados **verde** se encontra uma célula de fundo **amarelo** com o item **Quantidade de lodo**. Esta célula é uma reprodução à célula **D5** e foi criada para facilitar a observação dos resultados. É possível alterar a **Quantidade de lodo** utilizando as flechas (↕) sem retornar ao início da planilha.

FONTE: Elaboração própria

FIGURA 18: ABA 2-A – ÁREA DE INPUT DA PLANILHA AVALIADORA DE RENTABILIDADE

| LODO   |                      |            | PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO LODO        |                       |       |
|--|----------------------|------------|---|-----------------------|-------|
| Quantidade de Lodo                             | t / d                | 29,00      | Densidade do lodo                           | t / m <sup>3</sup>    | 1,026 |
| CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO                          |                      |            | Calor específico do lodo                    | kJ / (kg x °C)        | 4,18  |
| Temperatura do lodo                            | °C                   | 20         | Sólidos totais (TS)                         | %                     | 8     |
| Temperatura do reator                          | °C                   | 40         | Sólidos voláteis (SV) / Sólidos totais (ST) | %                     | 75    |
| Consumo elétrico                               | kWh / d              | 40         | Produção de biogás                          | m <sup>3</sup> / t.VS | 400   |
| Perda de calor do reator para o ambiente (k12) | %                    | 30         | REATOR                                      |                       |       |
| Operacionalidade                               | d / a                | 330        | Tempo de retenção                           | d                     | 30    |
| TARIFAS  |                      |            | Tempo morto                                 | d                     | 4     |
| Energia elétrica                               | R\$ / kWh            | 0,5383     | PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO GÁS         |                       |       |
| Gás natural                                    | R\$ / m <sup>3</sup> | 2,2620     | Concentração de CH <sub>4</sub> no biogás   | %                     | 65    |
| Taxa de Câmbio (USD/BRL)                       | R\$                  | 3,85       | Potencial calorífico CH <sub>4</sub>        | kWh / m <sup>3</sup>  | 9,97  |
| FINANÇAS                                       |                      |            | Potencial calorífico Gás Natural            | kWh / m <sup>3</sup>  | 11,1  |
| Custo total projeto com MDC                    | R\$                  | 401.774,00 | GRUPO GERADOR                               |                       |       |
| Montante financiado                            | %                    | 100        | Eficiência elétrica                         | %                     | 37    |
| CAPEX maquinário                               | R\$                  | 101.039,66 | Eficiência térmica                          | %                     | 45    |
| CAPEX fermentador                              | R\$                  | 92.293,00  | Legenda                                     |                       |       |
| CAPEX grupo gerador (CHP)                      | R\$                  | 155.000,00 | Célula configurável                         |                       |       |
| Horas operação MDO                             | h / d                | 4          |   |                       |       |
| Preço operação MDO                             | R\$ / mês            | 2.000      |   |                       |       |
| TMA  | % a.a.               | 10,8       |   |                       |       |
| Juros do financiamento                         | % a.a.               | 6,5        |   |                       |       |

FONTE: Elaboração própria

FIGURA 19: ABA 2-B – ÁREA DE OUTPUT DA PLANILHA AVALIADORA DE RENTABILIDADE

| RESULTADOS OPERACIONAIS          |                        |            | VIABILIDADE FINANCEIRA |           |          |
|----------------------------------|------------------------|------------|------------------------|-----------|----------|
| Quantidade de animais            | un.                    | 5.653      | TIR 5 anos             | %         | 3,7%     |
| Quantidade de lodo               | t / d                  | 29,00      | VPL 5 anos             | R\$       | - 55.936 |
| Fator produção ótima             | %                      | 81         | TIR 10 anos            | %         | 24,1%    |
| Produção de biogás               | m <sup>3</sup> / d     | 561        | VPL 10 anos            | R\$       | 224.225  |
| Produção de CH <sub>4</sub>      | m <sup>3</sup> / d     | 365        | PAYBACK                | anos      | 5        |
| Produção CRE**                   | tCO <sub>2</sub> e / d | 7          |                        | meses     | 10       |
| Geração líquida de eletricidade  | kWh / d                | 1.305      | LCOE                   | R\$ / kWh | 0,19     |
| Geração líquida de calor**       | kWh / d                | 760        |                        |           |          |
| Consumo térmico do reator        | kWh / d                | 875        |                        |           |          |
| Produção biofertilizante**       | m <sup>3</sup> / d     | 28         |                        |           |          |
| ** não contabilizado na DRE      |                        |            |                        |           |          |
| DRE                              |                        |            |                        |           |          |
| Receita Bruta                    | R\$ / ano              | 231.804,19 |                        |           |          |
| ICMS (-)                         |                        | -          |                        |           |          |
| Exportação de eletricidade (ROL) |                        | 231.804,19 |                        |           |          |
| Despesas operacionais (-)        |                        | 13.750,00  |                        |           |          |
| Despesas não operacionais (-)    |                        | 47.329,59  |                        |           |          |
| Despesas financeiras (-)         |                        | 70.756,87  |                        |           |          |
| Resultado líquido                |                        | 99.967,73  |                        |           |          |

FONTE: Elaboração própria

FIGURA 20: ABA 3 – PROJEÇÃO DO FINANCIAMENTO DA PLANILHA AVALIADORA DE RENTABILIDADE

|                         |                      |      |  |  |  |
|-------------------------|----------------------|------|--|--|--|
| BANCO                   | Banco do Brasil S.A. |      |  |  |  |
| PROGRAMA                | INOVAGRO             |      |  |  |  |
| VALOR A FINANCIAR (R\$) | 401.774,00           |      |  |  |  |
| PERIODICIDADE PGT       | ANUAL                |      |  |  |  |
| PARCELAS                | 9                    |      |  |  |  |
| CARÊNCIA (anos)         | 1                    |      |  |  |  |
| JUROS NA CARÊNCIA       | SIM                  |      |  |  |  |
| TAXA DE JUROS           | 6,50%                | a.a. |  |  |  |
| IOF BNDES               | 0,38%                | a.a. |  |  |  |
| TOTAL DESP FINANC (R\$) | 160.303,58           |      |  |  |  |
| CCF                     | 0,14                 |      |  |  |  |
| ANUIDADE MÉDIA          | 55.888,65            |      |  |  |  |

|                  |     |           |           |           |               |
|------------------|-----|-----------|-----------|-----------|---------------|
| [R\$]            | ANO | JUROS     | CAPITAL   | PRESTAÇÃO | SALDO DEVEDOR |
| IOF BNDES        | 0   | -         | -         | 1.526,74  | 401.774,00    |
| TAXA CONTRATAÇÃO | 0   | 2.084,98  | -         | 2.084,98  | 401.774,00    |
| JUROS CARÊNCIA   | 1   | 26.115,31 | -         | 26.115,31 | 401.774,00    |
|                  | 2   | 26.115,31 | 44.641,56 | 70.756,87 | 357.132,44    |
|                  | 3   | 23.213,61 | 44.641,56 | 67.855,16 | 312.490,89    |
|                  | 4   | 20.311,91 | 44.641,56 | 64.953,46 | 267.849,33    |
|                  | 5   | 17.410,21 | 44.641,56 | 62.051,76 | 223.207,78    |
|                  | 6   | 14.508,51 | 44.641,56 | 59.150,06 | 178.566,22    |
|                  | 7   | 11.606,80 | 44.641,56 | 56.248,36 | 133.924,67    |
|                  | 8   | 8.705,10  | 44.641,56 | 53.346,66 | 89.283,11     |
|                  | 9   | 5.803,40  | 44.641,56 | 50.444,96 | 44.641,56     |
|                  | 10  | 2.901,70  | 44.641,56 | 47.543,26 | -             |

FONTE: Elaboração própria

Ao utilizar a planilha se nota a simplicidade da operação para o usuário. Basta ele digitar ou utilizar as barras com botões para a parte de input para descrever suas condições já estabelecidas e observar os resultados na parte seguinte de output.

A planilha está colorida de forma a explicitar as áreas de input, output, valores bons (verde) e insatisfatórios (vermelho ou rosa). Além disso, está bloqueada de forma que o usuário poderá alterar apenas as células de input, a fim de prevenir alterações e erros nos resultados.

Por sua vez, a parte de output conta com resultados técnicos operacionais da operação, assim como resultados financeiros, em forma de demonstração de resultados com valores nominais e proporcionais em margem e também o cálculo dos índices econômicos trabalhados nesta pesquisa, tais como o VPL, TIR e payback.

Se espera, portanto, que o usuário interessado - seja ele um proprietário ou operador de um biodigestor já instalado e que busca aumentar eficiência ou um potencial investidor que procura saber se vale a pena o investimento – consiga de forma clara, simples e efetiva entender quais as condições necessárias para obter sucesso neste tipo de investimento em biodigestão de dejetos de suínos.

## 6 CONCLUSÃO

Dentro do ambiente da digestão anaeróbica os parâmetros regime de abastecimento do reator, temperatura, tempo de retenção e homogenização do substrato são importantes e devem ser controlados a fim de auferir uma ótima performance. Estes parâmetros interferem na produção de biogás e, por isso, devem ser levados em conta no cálculo da estimativa do potencial de conversão de energia e expectativa de rentabilidade da planta.

Os equipamentos necessários para uma ótima performance são; o trocador de calor e o agitador mecânico. Além disso, se evidencia a importância do abastecimento constante no reator e da construção de tanques semiesféricos para facilitar o processo de agitação e evitar despesas com manutenção devido a sedimentação.

Não se encontrou na literatura menção a tanques de reatores retangulares ausentes de agitador e controle de temperatura, como é comum observar no Brasil.

A partir do método de cálculo do Fator de Produção Ótima, foi possível concluir que o processo de digestão anaeróbica - com o a temperatura do lodo no reator em 40°C, com 30 dias de tempo de retenção e agitador mecânico para homogenização - registrou uma diferença entre o volume de metano produzido e o volume de metano potencial esperado significativa em -19%. Por isso, este método pode ser levado em conta nas estimativas de receita do projeto do biodigestor, a fim de obter uma perspectiva conservadora.

O menor cenário C1 ( $20 \frac{t}{d}$ ) se mostrou inviável para o projeto orçado. Tanto a TIR quanto o VPL para 5 ou 10 anos são negativos e, portanto, não satisfatórios. Assim, se sugere para este cenário um projeto com menor capacidade instalada de geração de energia para reduzir os custos e almejar a viabilidade.

Quanto ao C2 ( $30 \frac{t}{d}$ ), os indicadores para 5 anos também não são satisfatórios. Contudo, conta com *Payback* (PB) em 5 anos e 3 meses e para 10 anos registra TIR de 27% e VPL de R\$ 274 mil.

O C3 ( $40 \frac{t}{d}$ ) de resíduos indica um investimento promissor tanto em 5 quanto em 10 anos com TIR de 45% e 58%, respectivamente, com PB precisamente 3 anos.



O cenário com maior quantidade de resíduos é o que se mostrou o mais atrativo; o C4 ( $50 \frac{t}{d}$ ) registra em 5 anos TIR de 87% com VPL de R\$ 570 mil. Para 10 anos a taxa de retorno sobe para 95% e monta aproximadamente R\$ 1,3 milhão de VPL. O tempo de retorno do investimento também é o mais curto: apenas 2,2 anos.

Foi possível concluir que para registrar retorno financeiro satisfatório ou PB em 10 anos, a propriedade deve gerar no mínimo  $24,5 \frac{t}{d}$  de resíduo disponível para alimentação do reator. Paralelamente, para registrar lucro e tempo de retorno do investimento em 5 anos, a quantidade mínima deve ser 26% maior ou  $30,9 \frac{t}{d}$ .

Ao cruzar os dados com o perfil do produtor suinícola brasileiro, se pode concluir que tal projeto de biodigestão com geração de energia renovável é viável na média para aproximadamente 20% das granjas nacionais, 21% das granjas do Paraná, 26% do RS e cerca de 22% de SC. No PR esta margem representa 122 produtores suinícolas.

No entanto, isso não quer dizer que produtores menores não devem levar em consideração o aproveitamento energético dos resíduos de seus animais, mas sim, buscar a construção de um reator mais enxuto, que mantenha os equipamentos necessários para a performance ótima e com uma capacidade instalada de geração de energia menor do que 75 kW. Já que o grupo gerador (unidade CHP) representou sozinho 40% do valor total do orçamento.

A planilha avaliadora e calculadora de rentabilidade apresentada por este trabalho pode ajudar a fomentar novos negócios de biodigestores na indústria suinícola para produtores de todos os portes e, ainda, ajudar os operadores de biodigestores já instalados na administração do dia-a-dia e na maximização produtiva marginal.

O melhor resultado desta flexível e simples ferramenta pode ser motivar e tornar realidade investimentos em propriedades de pequenos e médios produtores, que não fazem o aproveitamento energético dos resíduos por falta de segurança, baixa expectativa e experiência com os resultados.

O comprometimento com a técnica de construção de reatores de biodigestão ótimos tem o potencial de pulverizar e aumentar a capacidade de potência instalada para geração de energia elétrica descentralizada, a qualidade dos corpos d'água, da atmosfera e deixar o Sul ainda mais competitivo no cenário internacional.

## REFERÊNCIAS

APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGRÈVE, J.; DEWIL, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science**. Elsevier, v. 34, p. 755-781, Dezembro 2018. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128508000312?via%3Dihub>>. Acesso em 6 de Outubro 2017.

AL SAEDI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. **Biogas handbook**. Esbjerg, Dinamarca: University of Southern Denmark, 2008. Disponível em: < <http://lemvigbiogas.com>>. Acesso em: 14 Julho 2018.

ALTERLAT. [2018]. **Sistema remoção de biogás siloxanos e compostos orgânicos de voláteis**. Disponível em:<[http://alterlat.com/?page\\_id=866](http://alterlat.com/?page_id=866)>. Acesso em: 29 Maio 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Matriz energética. **Banco de informações de geração (BIG)**, v. 4763, 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em 26 de Novembro 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Micro e minigeração distribuída. **Cadernos Temáticos ANEEL**, v.1, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Tarifa Branca**. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>>. Acesso em 27 de Dezembro 2018.

BANCO DO BRASIL (BB). Banco do Brasil. Crédito para financiar a inovação tecnológica nas propriedades rurais. **Inovagro**. Disponível em: <<http://www.bb.com.br/pbb/pagina-inicial/agronegocios/agronegocio---produtos-e-servicos/credito/investir-em-sua-atividade/inovagro#/>>. Acesso em: 16 de Dezembro 2017.

BIASI, C. A. F.; MARIANI, L. F.; PICINATTO, A. G.; ZANK, J. C. C. **Energias renováveis na área rural da região sul do Brasil**. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2018. 202p.

BIOGAS TECHNOLOGY GmbH (BIO TECH). **Trigeneration biogas facility with attached absorption freezing machine**. [2008], 33 f. RWTH, Aachen. Disponível em:

<<http://www.daldrup.org/University/Biogas%20Technology%20GmbH%20BP.pdf>>. Acesso em 13 Fevereiro 2018.

BIOKÖHLER. **Orçamentos, parâmetros, consumo e boas práticas de um biodigestor ótimo de 75 kW no Paraná** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida

por [biokohler@biokohler.com] Comunicação pessoal com a empresa em 14 de Dezembro 2017.

BOLZONELLA, D.; PAVAN, P.; BATTISTONI, P.; CECCHI, F. Mesophilic anaerobic digestion of waste activated sludge: influence of the solid retention time in the wastewater treatment process. **Process Biochemistry**. Elsevier, v 40, p. 1453–1460, Março 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032959204002614?via%3Dihub>>. Acesso em 14 Dezembro 2017.

BRITISH PETROLEUM (BP). **BP Statistical Review of World Energy June 2017**. Renewable energy. v. 66, Junho 2017. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>>. Acesso em 14 Dezembro 2017.

BRASUMA, 2017. **Visitas técnicas a biodigestores em Toledo-PR com Geraldo Linck**. Entre Rios do Oeste-PR. 11 de Março 2017. Informação verbal.

BRUNI, A.L.; FAMÁ, R. **As decisões de investimentos**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

BUDEL, D. A. **Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos em Residências**. 2017, 46 f. Trabalho de conclusão de curso. (Bacharelado em Engenharia de Produção) -Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria - RS, 2017.

CASTRO, A. B; SOUZA, F. E. P. **A Economia brasileira em marcha forçada**. São Paulo: Paz e Terra, 1985.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA ELÉTRICA (COPEL). **Tarifa convencional subgrupo B2 rural**. Resolução ANEEL n. 2.402 de 19 de Junho 2018. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2Fa9fd4c41fb35a23e03257488005939bc>>. Acesso em 14 de Julho 2018.

COMPANHIA PARANAENSE DE GÁS (COMPAGÁS). **Tabela de Preços Comercial de 01.10.2017**. Disponível em: <<http://agv.compagas.com.br/index.php?action=uiprecos.index&segmento=2>>. Acesso em 14 de Dezembro 2017.

CRUZ, A; PEREIRA, F; FIGUEIREDO, V. Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, RJ, v. 1, n. 45, p. 137-163, Março 2017. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/11734>>. Acesso em 10 de Julho de 2018.

ELTROP, L. **Palestra**. [nov. 2017]. Stuttgart: ISWA, Universität Stuttgart, 2017. Palestra proferida durante os seminários técnicos 9º Curso MAUI de Extensão

Internacional na Alemanha em Meio Ambiente 2017 - Biogas plants in Germany - trends, technologies and targets.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Suínos: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF, Embrapa-SPI, 3. ed, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. [2018]. Acesso em 08 de Junho 2018.

FACHVERBAND BIOGAS. **German biogas scenario: biogas basics workshop**. [fev. 2017]. Disponível em: <<https://app.box.com/v/IBABTT17Content>>. Acesso em 14 de Dezembro 2017.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFF e.V. (FNR). (2008). **Biogas: an introduction**. Gülzow: FNR, 2008. 1 ed., 25 p. Disponível em <<https://mediathek.fnr.de/biogas-an-introduction.html>>. Acesso em 17 de Novembro 2017.

FERREIRA, C. R. **Avaliação da Influência da Alimentação de Biodigestores na Produção Flexível de Biogás**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) -Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2015.

FONSECA, J. W. F. **Elaboração e análise de projetos: a viabilidade econômico-financeira**. São Paulo: Editora Atlas, 1. ed., 224 p., 2012.

FRAUNHOFER INSTITUT FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (FRAUNHOFER ISE). **Levelized cost of electricity: renewable energy technologies**. Freiburg, Fraunhofer ISE, Novembro 2013. Disponível em: <[https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE\\_LCOE\\_Renewable\\_Energy\\_technologies.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE_LCOE_Renewable_Energy_technologies.pdf)>. Acesso em 27 de Fevereiro 2018.

FRAUNHOFER INSTITUT FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (FRAUNHOFER ISE). **Stromerzeugung in Deutschland in 2017**. Disponível em: <[https://www.energy-charts.de/energy\\_pie\\_de.htm](https://www.energy-charts.de/energy_pie_de.htm)>. [2017]. Acesso em 14 de Dezembro 2017.

GAZPROM. **A New pipeline for Europe's energy future**. [2018]. Disponível em: <<http://www.gazprom.com/about/production/projects/pipelines/built/nord-stream2/>>. Acesso em 18 de Julho 2018.

GUIMARÃES, D.; AMARAL, G.; MAIA, G.; LEMOS, M.; ITO, M.; CUSTODIO, S. **Suinocultura: estrutura da cadeia produtiva, panorama do setor no Brasil e no mundo e o apoio do BNDES**. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, RJ, v. 1, n. 45, p. 85-136, Março 2017. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/11734>>. Acesso em 10 de Julho de 2018.

HEAL, G. **The economics of renewable energy**. Cambridge, MA, Oxford University

Press for Association of Environmental and Resource Economists, v. 4, p. 139-154, 2010. Disponível em: <<http://www.nber.org/papers/w15081>>. Acesso em 14 de Julho 2018.

HUNDT, B. **Energie- und Klimateffizienz von Biogasanlagen mit Biogasaufbereitung und -einspeisung unter Nutzung von Silomais**: Untersuchungen am Beispiel der Biogasanlage der HSE AG in Darmstadt-Wixhausen. 2010. 201 f. Tese (Dr. rer. nat.)-Justus-Liebig-Universität, Gießen, 2010.

INTERNATIONAL BANK FOR RECONSTRUCTION AND DEVELOPMENT (BANCO MUNDIAL); ECOFYS. **State and Trends of Carbon Pricing 2018**. Washington, DC, 62 f., Maio, 2018. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/29687/9781464812927.pdf>>. Acesso em 18 de Julho 2018.

INTERNATIONAL BANK FOR RECONSTRUCTION AND DEVELOPMENT (BANCO MUNDIAL); FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). [2015]. **Agricultural Land**. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.K2>>. Acesso em 08 de Abril 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Brazil's energy balance**. 2015. Disponível em: <<http://www.iea.org/sankey/#?c=Brazil&s=Balance>>. Acesso em 01 de Junho 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Germany's energy balance**. 2015. Disponível em: <<http://www.iea.org/sankey/#?c=Germany&s=Balance>>. Acesso em 01 de Junho de 2018.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP). **Instrução Normativa IAP/DIRAM 105.006**, de 23 de Junho de 2009. Estabelecer as características dos empreendimentos, critérios - inclusive locacionais e técnicos, procedimentos, trâmite administrativo, níveis de competência e premissas para o Licenciamento Ambiental de Empreendimentos de Suinocultura. Disponível em: <[http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao\\_ambiental/Legislacao\\_estadual/Instrucao\\_normativa/IN\\_105\\_006\\_SUINOS\\_VERSAO23JUN2009.pdf](http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/Instrucao_normativa/IN_105_006_SUINOS_VERSAO23JUN2009.pdf)>. Acesso em 04 de Junho de 2018.

ITAUPU BINACIONAL. **Geração**. 2016. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>>. Acesso em 14 de Dezembro 2017.

ITAIPU BINACIONAL. **Nossa História**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/nossahistoria>>. Acesso em 14 de Dezembro de 2017.

JONES, P., SALTER, A. Modelling the economics of farm-based anaerobic digestion in a UK whole-farm context. **Energy Policy**. Elsevier, v. 62, p. 215–225., Julho 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.109>>. Acesso em 14 de Dezembro de 2017.

KEDIA, G. **Palestra**. [nov. 2017]. Stuttgart, Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2017. Palestra proferida por ocasião do First International Symposium on industrial

environmental technology development - M.Sc. Air Quality Control, Solid Waste and Waste Water Process Engineering (WASTE) - Biogas: A new trend towards the future of solid waste management.

KRANERT, M. **Design of biological waste treatment plants**. Institute for Sanitary Engineering, Water Quality and Solid Waste Management (ISWA): Stuttgart, 2013.

KUNZ, A; OLIVEIRA, P. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista de política agrícola**, ano XV, n. 3., Setembro 2006, p. 28-35.

MACKAY, D. J. C. **Sustainable Energy**: Without the hot air. Cambridge, UIT Cambridge, 2008. Disponível em: <[www.withouthotair.com](http://www.withouthotair.com)>. Acesso em 4 de Abril 2018.

MOTTA, K. U. **Avaliação da Geração de Biogás de um Biodigestor de Dejetos Bovinos e Suínos**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná - UFPR. Curitiba, 2012.

MYHRE, G; SHINDELL, D. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis** Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1535 f., p. 659-740, 2013.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). [2018] **Distributed Generation Energy Technology Operations and Maintenance Costs**. Disponível em: <<https://bit.ly/2NfWsqr>>. Acesso em 4 de Julho 2018.

NEUFFER, D. **Anaerobe Co-Fermentation von Konzentraten aus der Textilveredlungsindustrie**. 2004. 214 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2004.

OLIVEIRA, P. A. V. de. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. CNPSA – EMBRAPA: Concórdia, SC, v. 27, 179 f. 1993.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Report of the World Commission on Environment and Development**: Our Common Future. Assembléia geral A/42/427 - Development and International Co-operation: Environment, 1987. Disponível em: <<http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>>. Acesso em 27 de Fevereiro 2018.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD); FOOD AND AGRICULTURE ORGANISATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Meat. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2017-2026**. OECD: Paris, França, Julho 2017. Disponível em: <[https://doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2017-en](https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2017-en)>. Acesso em 14 de Junho 2018.

PARANÁ. Casa de Leis. **Projeto de Lei da Assembléia Legislativa do Estado do Paraná n. 378**, de 13 de Junho de 2018. Inclui benefícios para incentivar o aproveitamento de energia elétrica produzida por microgeradores e minigeradores.

Disponível em: < <http://portal.alep.pr.gov.br/index.php/pesquisa-legislativa/proposicao?idProposicao=55447>>. Acessado em: 13.07.2018

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE); ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CRIADORES DE SUÍNOS (ABCS). **Mapeamento da Suinocultura Brasileira**, Brasília, DF, 1 ed., 2016.

SMIL, V. **Power density**: A key to understanding energy sources and uses. The MIT Press, Cambridge, US, 330 f. Setembro 2016.

SMIL, V. **What I See When I See a Wind Turbine**. IEEE Spectrum, p. 27, 2016. Disponível em: <<http://vaclavsmil.com/wp-content/uploads/15.WINDTURBINE.pdf>>. Acesso em 18 Julho 2018.

SMIL, V. World History and Energy. **Encyclopedia of Energy**. Elsevier, v. 6, p. 549–561, 2004.

SULEWSKI, P.; MAJESWKI, E.; WAS, A.; SZYMANSKA, M.; MALAK-RAWLIKOWSKA, A.; FRAJ, A.; TRZASKI, A.; WISZNIEWSKI, A.; AMROZY, M. Economic and legal conditions and profitability of investments in agricultural biogas plans in Poland. **Problems of Agricultural Economics**, v. 1, n. 346, p. 119-142, 2016. Disponível em: <<http://ssrn.com/abstract=2848972>>. Acesso em 21 de Fevereiro 2016.

TRABALHA BRASIL. [2018]. **Média salarial trabalhador rural**. Disponível em: <<https://www.trabalhabrasil.com.br/media-salarial-para-trabalhador-rural>>. Acesso em: 29 de Maio 2018.

TRADEMAP. [2017]. List of exporters for the selected product in 2016. **Product : 0203 Meat of swine, fresh, chilled or frozen**. Disponível em: <[http://www.trademap.org/Country\\_SelProduct.aspx?nvpm=1||||0203|||4|1|1|2|1|1|2|1|1|1](http://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=1||||0203|||4|1|1|2|1|1|2|1|1|1)>. Acesso em 14 de Dezembro de 2017.

TRADEMAP. [2017]. List of importing markets for the product exported by United States of America in 2016. **Product: 0203 Meat of swine, fresh, chilled or frozen**. Disponível em: <[http://www.trademap.org/Country\\_SelProductCountry.aspx?nvpm=1|842||||0203|||4|1|1|2|1|1|2|1|1|1](http://www.trademap.org/Country_SelProductCountry.aspx?nvpm=1|842||||0203|||4|1|1|2|1|1|2|1|1|1)> . Acesso em 14 de Dezembro de 2017.

TRADEMAP. [2017]. List of importing markets for the product exported by Brazil in 2016. **Product: 0203 Meat of swine, fresh, chilled or frozen**. Disponível em: <[http://www.trademap.org/Country\\_SelProductCountry.aspx?nvpm=1|076||||0203|||4|1|1|2|1|1|2|1|1|1](http://www.trademap.org/Country_SelProductCountry.aspx?nvpm=1|076||||0203|||4|1|1|2|1|1|2|1|1|1)> . Acesso em 14 de Dezembro de 2017.

TRADEMAP. [2017]. List of importing markets for the product exported by Germany in 2016. **Product: 0203 Meat of swine, fresh, chilled or frozen**. Disponível em: <[http://www.trademap.org/Country\\_SelProductCountry.aspx?nvpm=1|276||||0203|||4|1|1|2|1|1|2|1|1|1](http://www.trademap.org/Country_SelProductCountry.aspx?nvpm=1|276||||0203|||4|1|1|2|1|1|2|1|1|1)> . Acesso em 14 de Dezembro de 2017.

TRADEMAP. [2017]. List of importing markets for the product exported by United



States of America in 2016. **Product: 0203 Meat of swine, fresh, chilled or frozen.** Disponível em: <[http://www.trademap.org/Country\\_SelProductCountry.aspx?nvpm=1|842|||0203|||4|1|1|2|1|1|2|1|1|1](http://www.trademap.org/Country_SelProductCountry.aspx?nvpm=1|842|||0203|||4|1|1|2|1|1|2|1|1|1)> . Acesso em 14 de Dezembro de 2017.

TRADEMAP. [2017]. List of supplying markets for the product imported by Germany in 2017. **Product: 2701 Coal; briquettes, ovoids and similar solid fuel manufactured from coal.** Disponível em: <[https://www.trademap.org/Country\\_SelProductCountry.aspx?nvpm=1|276|||2701|||4|1|1|1|1|1|2|1|1|1](https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry.aspx?nvpm=1|276|||2701|||4|1|1|1|1|1|2|1|1|1)> . Acesso em 14 de Dezembro de 2017.

TRADEMAP. [2017]. List of supplying markets for the product imported by Germany in 2016. **Product: 2711 Petroleum gas and other gaseous hydrocarbons.** Disponível em: <[https://www.trademap.org/Country\\_SelProductCountry.aspx?nvpm=1|276|||2711|||4|1|1|1|1|1|2|1|1|1](https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry.aspx?nvpm=1|276|||2711|||4|1|1|1|1|1|2|1|1|1)> . Acesso em 14 de Dezembro de 2017.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Livestock and Poultry** : World Markets and Trade. Washington, DC, 12 de Outubro, 2017.

UNITED STATES ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). Levelized cost and levelized avoided cost of new generation resources in the annual energy outlook 2017. **Independent statistics & analysis.** Abril 2017. Disponível em: <[https://www.eia.gov/outlooks/archive/aeo17/pdf/electricity\\_generation.pdf](https://www.eia.gov/outlooks/archive/aeo17/pdf/electricity_generation.pdf)> . Acesso em 27 Setembro 2018.

WEIßBACH, D.; RUPRECHT, G.; HUKE, A.; CZERSKI, K.; GOTTLIEB, S.; HUSSEIN, A. **Energy intensities , EROIs , and energy payback times of electricity generating power plants.** TU-Berlin, Berlin, 29 f., Abril 2013.

WU, A.; LOVETT, D.; McEWAN, M.; CECELJA, F.; CHEN, T. Bioresource Technology A spreadsheet calculator for estimating biogas production and economic measures for UK-based farm-fed anaerobic digesters. **Bioresource Technology.** Elsevier, v. 220 , p. 479–489, Agosto 2016. Disponível em: <<https://s100.copyright.com/AppDispatchServlet?publisherName=ELS&contentID=S096085241631241X&orderBeanReset=true>> . Acesso em 03 Dezembro 2017.

ZHANG, R.; EL-MASHAD, H. H.; HARTMAN, K.; WANG, F.; LIU, G.; CHOATE, C.; GAMBLE, P. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. **Bioresource Technology.** Elsevier, v. 98, p. 929–935. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852406000940>> . Acesso em 14 Dezembro de 2017.



APÊNDICE 1 - FLUXOS DE CAIXA E DA DÍVIDA BANCÁRIA

○ FLUXOS DE CAIXA

• **C1**

| ANO | CAPEX      | RECEITAS   | DEPRECIAÇÃO | OPERAÇÃO  | MISC      | FINANCIAMENTO | TRIBUTAÇÃO | LUCRO / PREJU | FLUXO DE CAIXA | FLUXO ACUM | FLUXO DESC | FLUXO ACUM<br>DESC |
|-----|------------|------------|-------------|-----------|-----------|---------------|------------|---------------|----------------|------------|------------|--------------------|
| 1   | 401.774,00 | 78.829,95  | 26.429,63   | 13.750,00 | 20.899,96 | 29.727,03     | -          | 413.750,67    | -              | 413.750,67 | 373.421,18 | -                  |
| 2   |            | 157.659,90 | 26.429,63   | 14.162,50 | 20.899,96 | 70.756,87     | -          | 25.410,95     | 25.410,95      | 388.339,72 | 20.698,62  | -                  |
| 3   |            | 157.659,90 | 26.429,63   | 14.587,38 | 20.899,96 | 67.855,16     | -          | 27.887,78     | 27.887,78      | 360.451,94 | 20.501,92  | -                  |
| 4   |            | 157.659,90 | 26.429,63   | 15.025,00 | 20.899,96 | 64.953,46     | -          | 30.351,86     | 30.351,86      | 330.100,08 | 20.138,46  | -                  |
| 5   |            | 157.659,90 | 26.429,63   | 15.475,75 | 20.899,96 | 62.051,76     | -          | 32.802,81     | 32.802,81      | 297.297,28 | 19.643,20  | -                  |
| 6   |            | 157.659,90 | 26.429,63   | 15.940,02 | 20.899,96 | 59.150,06     | -          | 35.240,24     | 35.240,24      | 262.057,04 | 19.045,85  | -                  |
| 7   |            | 157.659,90 | 26.429,63   | 16.418,22 | 20.899,96 | 56.248,36     | -          | 37.663,74     | 37.663,74      | 224.393,30 | 18.371,52  | -                  |
| 8   |            | 157.659,90 | 26.429,63   | 16.910,77 | 20.899,96 | 53.344,66     | -          | 40.072,89     | 40.072,89      | 184.320,41 | 17.641,38  | -                  |
| 9   |            | 157.659,90 | 26.429,63   | 17.418,09 | 20.899,96 | 50.444,96     | -          | 42.467,27     | 42.467,27      | 141.853,14 | 16.873,16  | -                  |
| 10  |            | 157.659,90 | 26.429,63   | 17.940,63 | 21.139,96 | 47.543,26     | -          | 44.606,43     | 44.606,43      | 97.246,71  | 15.995,57  | -                  |

• **C2**

| ANO | CAPEX      | RECEITAS   | DEPRECIAÇÃO | OPERAÇÃO  | MISC      | FINANCIAMENTO | TRIBUTAÇÃO | LUCRO / PREJU | FLUXO DE CAIXA | FLUXO ACUM | FLUXO DESC | FLUXO ACUM<br>DESC |
|-----|------------|------------|-------------|-----------|-----------|---------------|------------|---------------|----------------|------------|------------|--------------------|
| 1   | 401.774,00 | 120.021,22 | 26.429,63   | 13.750,00 | 20.899,96 | 29.727,03     | -          | 372.559,40    | -              | 372.559,40 | 336.244,95 | -                  |
| 2   |            | 240.042,44 | 26.429,63   | 14.162,50 | 20.899,96 | 70.756,87     | -          | 107.793,48    | 107.793,48     | 264.766,92 | 87.803,74  | -                  |
| 3   |            | 240.042,44 | 26.429,63   | 14.587,38 | 20.899,96 | 67.855,16     | -          | 110.270,31    | 110.270,31     | 154.496,60 | 81.066,11  | -                  |
| 4   |            | 240.042,44 | 26.429,63   | 15.025,00 | 20.899,96 | 64.953,46     | -          | 112.734,39    | 112.734,39     | 41.761,21  | 74.799,27  | -                  |
| 5   |            | 240.042,44 | 26.429,63   | 15.475,75 | 20.899,96 | 62.051,76     | -          | 115.185,34    | 115.185,34     | 73.424,13  | 68.976,06  | -                  |
| 6   |            | 240.042,44 | 26.429,63   | 15.940,02 | 20.899,96 | 59.150,06     | -          | 117.622,77    | 117.622,77     | 191.046,90 | 63.570,09  | -                  |
| 7   |            | 240.042,44 | 26.429,63   | 16.418,22 | 20.899,96 | 56.248,36     | -          | 120.046,27    | 120.046,27     | 311.093,17 | 58.555,86  | -                  |
| 8   |            | 240.042,44 | 26.429,63   | 16.910,77 | 20.899,96 | 53.346,66     | -          | 122.455,43    | 122.455,43     | 433.548,60 | 53.908,84  | -                  |
| 9   |            | 240.042,44 | 26.429,63   | 17.418,09 | 20.899,96 | 50.444,96     | -          | 124.849,80    | 124.849,80     | 558.398,40 | 49.605,52  | -                  |
| 10  |            | 240.042,44 | 26.429,63   | 17.940,63 | 21.139,96 | 47.543,26     | -          | 126.988,96    | 126.988,96     | 685.387,36 | 45.537,41  | -                  |

• C3

| ANO | CAPEX      | RECEITAS   | DEPRECIAÇÃO | OPERAÇÃO  | MSC       | FINANCIAMENTO | TRIBUTAÇÃO | LUCRO / PREJU | FLUXO DE CAIXA | FLUXO ACUM   | FLUXO DESC | FLUXO ACUM DESC |
|-----|------------|------------|-------------|-----------|-----------|---------------|------------|---------------|----------------|--------------|------------|-----------------|
| 1   | 401.774,00 | 161.212,49 | 26.429,63   | 13.750,00 | 20.899,96 | 29.727,03     | -          | 331.368,13    | - 331.368,13   | - 331.368,13 | 299.068,71 | - 299.068,71    |
| 2   |            | 322.424,97 | 26.429,63   | 14.162,50 | 20.899,96 | 70.756,87     | -          | 190.176,02    | 190.176,02     | - 141.192,11 | 154.908,85 | - 144.159,86    |
| 3   |            | 322.424,97 | 26.429,63   | 14.587,38 | 20.899,96 | 67.856,16     | -          | 192.652,84    | 192.652,84     | 57.460,73    | 141.630,29 | - 2.529,57      |
| 4   |            | 322.424,97 | 26.429,63   | 15.026,00 | 20.899,96 | 64.953,46     | -          | 195.116,92    | 195.116,92     | 246.577,66   | 129.460,09 | - 126.930,52    |
| 5   |            | 322.424,97 | 26.429,63   | 15.475,75 | 20.899,96 | 62.051,76     | -          | 197.567,88    | 197.567,88     | 444.145,53   | 118.308,93 | - 245.239,45    |
| 6   |            | 322.424,97 | 26.429,63   | 15.940,02 | 20.899,96 | 59.150,06     | -          | 200.005,30    | 200.005,30     | 644.150,84   | 108.094,34 | - 353.333,79    |
| 7   |            | 322.424,97 | 26.429,63   | 16.418,22 | 20.899,96 | 56.248,36     | -          | 202.428,81    | 202.428,81     | 846.579,64   | 98.740,20  | - 452.073,98    |
| 8   |            | 322.424,97 | 26.429,63   | 16.910,77 | 20.899,96 | 53.346,66     | -          | 204.837,96    | 204.837,96     | 1.051.417,60 | 90.176,29  | - 542.280,27    |
| 9   |            | 322.424,97 | 26.429,63   | 17.418,09 | 20.899,96 | 50.444,96     | -          | 207.232,34    | 207.232,34     | 1.258.649,94 | 82.337,88  | - 624.588,15    |
| 10  |            | 322.424,97 | 26.429,63   | 17.940,63 | 21.139,96 | 47.543,26     | -          | 209.371,50    | 209.371,50     | 1.468.021,44 | 75.079,25  | - 699.667,41    |

• C4

| ANO | CAPEX      | RECEITAS   | DEPRECIAÇÃO | OPERAÇÃO  | MSC       | FINANCIAMENTO | TRIBUTAÇÃO | LUCRO / PREJU | FLUXO DE CAIXA | FLUXO ACUM   | FLUXO DESC | FLUXO ACUM DESC |
|-----|------------|------------|-------------|-----------|-----------|---------------|------------|---------------|----------------|--------------|------------|-----------------|
| 1   | 401.774,00 | 202.403,75 | 26.429,63   | 13.750,00 | 20.899,96 | 29.727,03     | -          | 290.176,87    | - 290.176,87   | - 290.176,87 | 261.892,48 | - 261.892,48    |
| 2   |            | 404.807,51 | 26.429,63   | 14.162,50 | 20.899,96 | 70.756,87     | -          | 272.558,55    | 272.558,55     | - 17.618,31  | 222.013,97 | - 39.878,51     |
| 3   |            | 404.807,51 | 26.429,63   | 14.587,38 | 20.899,96 | 67.856,16     | -          | 275.035,38    | 275.035,38     | 257.417,07   | 202.194,47 | - 162.315,96    |
| 4   |            | 404.807,51 | 26.429,63   | 15.026,00 | 20.899,96 | 64.953,46     | -          | 277.499,46    | 277.499,46     | 534.916,53   | 184.120,90 | - 346.436,87    |
| 5   |            | 404.807,51 | 26.429,63   | 15.475,75 | 20.899,96 | 62.051,76     | -          | 279.950,41    | 279.950,41     | 814.866,94   | 167.641,80 | - 514.078,66    |
| 6   |            | 404.807,51 | 26.429,63   | 15.940,02 | 20.899,96 | 59.150,06     | -          | 282.387,84    | 282.387,84     | 1.097.254,77 | 152.618,59 | - 666.697,25    |
| 7   |            | 404.807,51 | 26.429,63   | 16.418,22 | 20.899,96 | 56.248,36     | -          | 284.811,34    | 284.811,34     | 1.382.066,11 | 138.924,54 | - 805.621,78    |
| 8   |            | 404.807,51 | 26.429,63   | 16.910,77 | 20.899,96 | 53.346,66     | -          | 287.220,49    | 287.220,49     | 1.669.286,61 | 126.443,74 | - 932.065,53    |
| 9   |            | 404.807,51 | 26.429,63   | 17.418,09 | 20.899,96 | 50.444,96     | -          | 289.614,87    | 289.614,87     | 1.958.901,48 | 115.070,24 | - 1.047.135,77  |
| 10  |            | 404.807,51 | 26.429,63   | 17.940,63 | 21.139,96 | 47.543,26     | -          | 291.754,03    | 291.754,03     | 2.250.655,51 | 104.621,09 | - 1.151.756,86  |

• S10

| ANO | CAPEX      | RECEITAS   | DEPRECIAÇÃO | OPERAÇÃO  | MSC       | FINANCIAMENTO | TRIBUTAÇÃO | LUCRO / PREJU | FLUXO DE CAIXA | FLUXO ACUM   | FLUXO DESC | FLUXO ACUM DESC |
|-----|------------|------------|-------------|-----------|-----------|---------------|------------|---------------|----------------|--------------|------------|-----------------|
| 1   | 401.774,00 | 97.463,63  | 26.429,63   | 13.750,00 | 20.899,96 | 29.727,03     | -          | 396.116,99    | - 396.116,99   | - 396.116,99 | 356.603,78 | - 356.603,78    |
| 2   |            | 194.927,25 | 26.429,63   | 14.162,50 | 20.899,96 | 70.756,87     | -          | 62.678,30     | 62.678,30      | - 332.438,69 | 51.054,93  | - 305.548,86    |
| 3   |            | 194.927,25 | 26.429,63   | 14.587,38 | 20.899,96 | 67.855,16     | -          | 65.155,13     | 65.155,13      | - 267.283,57 | 47.899,32  | - 257.649,54    |
| 4   |            | 194.927,25 | 26.429,63   | 15.025,00 | 20.899,96 | 64.953,46     | -          | 67.619,21     | 67.619,21      | - 199.664,36 | 44.865,35  | - 212.784,19    |
| 5   |            | 194.927,25 | 26.429,63   | 15.475,75 | 20.899,96 | 62.051,76     | -          | 70.070,16     | 70.070,16      | - 129.594,21 | 41.959,88  | - 170.824,31    |
| 6   |            | 194.927,25 | 26.429,63   | 15.940,02 | 20.899,96 | 59.150,06     | -          | 72.507,59     | 72.507,59      | - 57.086,62  | 39.187,26  | - 131.637,05    |
| 7   |            | 194.927,25 | 26.429,63   | 16.418,22 | 20.899,96 | 56.248,36     | -          | 74.931,09     | 74.931,09      | - 17.844,46  | 36.549,69  | - 95.087,36     |
| 8   |            | 194.927,25 | 26.429,63   | 16.910,77 | 20.899,96 | 53.346,66     | -          | 77.340,24     | 77.340,24      | - 95.184,70  | 34.047,67  | - 61.039,69     |
| 9   |            | 194.927,25 | 26.429,63   | 17.418,09 | 20.899,96 | 50.444,96     | -          | 79.734,62     | 79.734,62      | - 174.919,32 | 31.680,28  | - 29.359,40     |
| 10  |            | 194.927,25 | 26.429,63   | 17.940,63 | 21.139,96 | 47.543,26     | -          | 81.873,78     | 81.873,78      | - 256.793,10 | 29.359,40  | - 0,00          |

• S5

| ANO | CAPEX      | RECEITAS   | DEPRECIAÇÃO | OPERAÇÃO  | MSC       | FINANCIAMENTO | TRIBUTAÇÃO | LUCRO / PREJU | FLUXO DE CAIXA | FLUXO ACUM   | FLUXO DESC | FLUXO ACUM DESC |
|-----|------------|------------|-------------|-----------|-----------|---------------|------------|---------------|----------------|--------------|------------|-----------------|
| 1   | 401.774,00 | 123.637,15 | 26.429,63   | 13.750,00 | 20.899,96 | 29.727,03     | -          | 368.943,47    | - 368.943,47   | - 368.943,47 | 332.981,47 | - 332.981,47    |
| 2   |            | 247.274,30 | 26.429,63   | 14.162,50 | 20.899,96 | 70.756,87     | -          | 115.025,35    | 115.025,35     | - 253.918,12 | 93.694,49  | - 239.286,98    |
| 3   |            | 247.274,30 | 26.429,63   | 14.587,38 | 20.899,96 | 67.855,16     | -          | 117.502,17    | 117.502,17     | - 136.415,95 | 86.382,67  | - 152.904,31    |
| 4   |            | 247.274,30 | 26.429,63   | 15.025,00 | 20.899,96 | 64.953,46     | -          | 119.966,25    | 119.966,25     | - 16.449,69  | 79.597,62  | - 73.306,70     |
| 5   |            | 247.274,30 | 26.429,63   | 15.475,75 | 20.899,96 | 62.051,76     | -          | 122.417,21    | 122.417,21     | - 105.967,51 | 73.306,70  | - 0,00          |
| 6   |            | 247.274,30 | 26.429,63   | 15.940,02 | 20.899,96 | 59.150,06     | -          | 124.854,63    | 124.854,63     | - 230.822,15 | 67.478,61  | - 67.478,61     |
| 7   |            | 247.274,30 | 26.429,63   | 16.418,22 | 20.899,96 | 56.248,36     | -          | 127.278,13    | 127.278,13     | - 358.100,28 | 62.083,40  | - 129.562,00    |
| 8   |            | 247.274,30 | 26.429,63   | 16.910,77 | 20.899,96 | 53.346,66     | -          | 129.687,29    | 129.687,29     | - 487.787,57 | 57.092,54  | - 186.654,54    |
| 9   |            | 247.274,30 | 26.429,63   | 17.418,09 | 20.899,96 | 50.444,96     | -          | 132.081,67    | 132.081,67     | - 619.869,24 | 52.478,90  | - 239.133,44    |
| 10  |            | 247.274,30 | 26.429,63   | 17.940,63 | 21.139,96 | 47.543,26     | -          | 134.220,83    | 134.220,83     | - 754.090,06 | 48.130,71  | - 287.264,15    |

○ **DÍVIDA BANCÁRIA**

|                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| BANCO                   | Banco do Brasil S.A. |
| PROGRAMA                | INOVAGRO             |
| VALOR A FINANCIAR (R\$) | 401.774,00           |
| PERIODICIDADE PGT       | ANUAL                |
| PARCELAS                | 9                    |
| CARÊNCIA (anos)         | 1                    |
| JUROS NA CARÊNCIA       | SIM                  |
| TAXA DE JUROS           | 6,50% a.a.           |
| IOF BNDES               | 0,38% a.a.           |
| TOTAL DESP FINANC (R\$) | 160.303,59           |
| CCF                     | 0,14                 |
| ANUIDADE MÉDIA          | 55.888,65            |

| [R\$]            | ANO | JUROS     | CAPITAL   | PRESTAÇÃO | SALDO DEVEDOR |
|------------------|-----|-----------|-----------|-----------|---------------|
| IOF BNDES        | 0   | -         | -         | 1.526,74  | 401.774,00    |
| TAXA CONTRATAÇÃO | 0   | 2.084,98  | -         | 2.084,98  | 401.774,00    |
| JUROS CARÊNCIA   | 1   | 26.115,31 | -         | 26.115,31 | 401.774,00    |
|                  | 2   | 26.115,31 | 44.641,55 | 70.756,86 | 357.132,45    |
|                  | 3   | 23.213,61 | 44.641,55 | 67.855,16 | 312.490,90    |
|                  | 4   | 20.311,91 | 44.641,55 | 64.953,46 | 267.849,35    |
|                  | 5   | 17.410,21 | 44.641,55 | 62.051,76 | 223.207,80    |
|                  | 6   | 14.508,51 | 44.641,55 | 59.150,06 | 178.566,25    |
|                  | 7   | 11.606,81 | 44.641,55 | 56.248,36 | 133.924,70    |
|                  | 8   | 8.705,11  | 44.641,55 | 53.346,66 | 89.283,15     |
|                  | 9   | 5.803,40  | 44.641,55 | 50.444,95 | 44.641,60     |
|                  | 10  | 2.901,70  | 44.641,55 | 47.543,25 | 0             |

Vale apontar que, o total do financiamento com os encargos é de R\$ 562.077,59 e conta com anuidade média projetada para amortização em 10 anos em R\$ 55.888,65, com Fator de Amortização de Capital (CCF) de 14% ao ano. Ou seja, o tomador do empréstimo deverá honrar com o pagamento de na média 14% do total financiado ao longo de 10 anos.

Assim, o valor das despesas financeiras equivale a 40% do total - ou pagamento aproximado de R\$ 160.303,59 apenas em juros, dado à elevada taxa cobrada pelo banco.

## ANEXO 1 - ORÇAMENTOS

Os orçamentos utilizados para os cálculos deste trabalho foram oferecidos pela empresa de construção de biodigestores Bioköhler em Toledo-PR.

| BIODIGESTOR 2.000m <sup>3</sup> |      |                    |                       |
|---------------------------------|------|--------------------|-----------------------|
| DESCRIÇÃO                       | QTDE | V.UNITÁRIO         | V.TOTAL               |
| GEOMEMBRANA 1,00mm              | 1400 | R\$ 21,40          | R\$ 29.960,00         |
| GEOMEMBRANA 1,25mm              | 1180 | R\$ 31,50          | R\$ 37.170,00         |
| ACESSO AGITADOR L2              | 2    | R\$ 3.425,00       | R\$ 6.850,00          |
| TUBO OCRE 250                   | 2    | R\$ 535,00         | R\$ 1.070,00          |
| AGITADOR L2 10 CV               | 1    | R\$ 23.540,00      | R\$ 23.540,00         |
| PAINEL AGITADOR                 | 1    | R\$ 1.337,00       | R\$ 1.337,00          |
| VÁLVULA DO BIOGÁS               | 2    | R\$ 1.819,00       | R\$ 3.638,00          |
| FLARE QUEIMADOR DE BIOGÁS       | 1    | R\$ 4.815,00       | R\$ 4.815,00          |
| SAÍDA DE BIOGÁS 4"              | 3    | R\$ 535,00         | R\$ 1.605,00          |
| MÃO DE OBRA                     | 1    | R\$ 32.100,00      | R\$ 32.100,00         |
|                                 |      | <b>VALOR TOTAL</b> | <b>R\$ 142.085,00</b> |
| DIAMETRO                        | 30   |                    |                       |
| PROFUNDIDADE                    | 4,5  | <b>DESCONTO</b>    | <b>5%</b>             |
|                                 |      | <b>VALOR TOTAL</b> | <b>144.980,75</b>     |

| TRATAMENTO DE BIOGÁS DE 40 ATÉ 100m <sup>3</sup> /h |      |                         |                      |
|---|------|-------------------------|----------------------|
| ITENS   | QTDE | V.UNITARIO              | V.TOTAL              |
| SECADOR DE BIOGÁS 2 CV PLUS                         | 1    | R\$ 18.725,00           | R\$ 18.725,00        |
| COMPRESSOR RADIAL 1/6CV                             | 1    | R\$ 2.247,00            | R\$ 2.247,00         |
| Medidor de Ar Rotâmetro                             | 1    | R\$ 1.177,00            | R\$ 1.177,00         |
| Tubos e conexões diversas                           | 1    | R\$ 695,50              | R\$ 695,50           |
| INSTALAÇÃO  | 1    | R\$ 3.745,00            | R\$ 3.745,00         |
|   |      | <b>TOTAL TRATAMENTO</b> | <b>R\$ 26.589,50</b> |

| VALOR TOTAL DO PROJETO |      |                |                       |
|------------------------|------|----------------|-----------------------|
| ITENS                  | QTDE | V.UNITARIO     | V.TOTAL               |
| GRUPO GERADOR 75 KW    | 1    | R\$ 155.000,00 | R\$ 155.000,00        |
| MATERIAL ELETRICO      | 1    | R\$ 6.000,00   | R\$ 6.000,00          |
| ESCAVACAO              | 30   | R\$ 260,00     | R\$ 7.800,00          |
| GERACAO DISTRIBUIDA    | 1    | R\$ 52.300,00  | R\$ 52.300,00         |
| CASA DE MAQUINA        | 1    | R\$ 12.000,00  | R\$ 12.000,00         |
|                        |      | <b>TOTAL</b>   | <b>R\$ 233.100,00</b> |

## ANEXO 2 - HISTÓRICO TAXA SELIC

| Reunião<br>nº | Período de vigência |          | Taxa SELIC<br>[% a.a.] |
|---------------|---------------------|----------|------------------------|
|               | data início         | data fim |                        |
| 213           | 21.03.18            | 09.07.18 | 6,5                    |
| 212           | 07.02.18            | 21.03.18 | 6,75                   |
| 211           | 06.12.17            | 07.02.18 | 7                      |
| 210           | 25.10.17            | 26.10.17 | 7,5                    |
| 209           | 06.09.17            | 25.10.17 | 8,25                   |
| 208           | 26.07.17            | 06.09.17 | 9,25                   |
| 207           | 31.05.17            | 26.07.17 | 10,25                  |
| 206           | 12.04.17            | 31.05.17 | 11,25                  |
| 205           | 22.02.17            | 12.04.17 | 12,25                  |
| 204           | 11.01.17            | 22.02.17 | 13                     |
| 203           | 30.11.16            | 11.01.17 | 13,75                  |
| 202           | 19.10.16            | 30.11.16 | 14                     |
| 201           | 31.08.16            | 19.10.16 | 14,25                  |
| 200           | 20.07.16            | 31.08.16 | 14,25                  |
| 199           | 08.06.16            | 20.07.16 | 14,25                  |
| 198           | 27.04.16            | 06.06.16 | 14,25                  |
| 197           | 02.03.16            | 27.04.16 | 14,25                  |
| 196           | 20.01.16            | 02.03.16 | 14,25                  |
| 195           | 25.11.15            | 20.01.16 | 14,25                  |
| 194           | 21.10.15            | 25.11.15 | 14,25                  |
| 193           | 02.09.15            | 21.10.15 | 14,25                  |
| 192           | 29.07.15            | 02.09.15 | 14,25                  |
| 191           | 03.06.15            | 30.07.15 | 13,75                  |
| 190           | 29.04.15            | 03.06.15 | 13,25                  |
| 189           | 04.03.15            | 29.04.15 | 12,75                  |
| 188           | 21.01.15            | 04.03.15 | 12,25                  |
| 187           | 03.12.14            | 21.01.15 | 11,75                  |
| 186           | 29.10.14            | 03.12.14 | 11,25                  |
| 185           | 03.09.14            | 29.10.14 | 11                     |
| 184           | 16.07.14            | 03.09.14 | 11                     |
| 183           | 28.05.14            | 16.07.14 | 11                     |
| 182           | 02.04.14            | 28.05.14 | 11                     |
| 181           | 26.02.14            | 02.04.14 | 10,75                  |
| 180           | 15.01.14            | 26.02.14 | 10,5                   |
| 179           | 27.11.13            | 15.01.14 | 10                     |
| 178           | 09.10.13            | 27.11.13 | 9,5                    |
| 177           | 28.08.13            | 09.10.13 | 9                      |
| 176           | 10.07.13            | 28.08.13 | 8,5                    |
| 175           | 29.05.13            | 10.07.13 | 8                      |

|     |          |          |       |
|-----|----------|----------|-------|
| 174 | 17.04.13 | 29.05.13 | 7,5   |
| 173 | 06.03.13 | 17.04.13 | 7,25  |
| 172 | 16.01.13 | 06.03.13 | 7,25  |
| 171 | 28.11.12 | 16.01.13 | 7,25  |
| 170 | 10.10.12 | 28.11.12 | 7,25  |
| 169 | 29.08.12 | 10.10.12 | 7,5   |
| 168 | 11.07.12 | 29.08.12 | 8     |
| 167 | 30.05.12 | 11.07.12 | 8,5   |
| 166 | 18.04.12 | 30.04.12 | 9     |
| 165 | 07.03.12 | 18.04.12 | 9,75  |
| 164 | 18.01.12 | 07.03.12 | 10,5  |
| 163 | 30.11.11 | 18.01.12 | 11    |
| 162 | 19.10.11 | 30.11.11 | 11,5  |
| 161 | 31.08.11 | 19.10.11 | 12    |
| 160 | 20.07.11 | 31.08.11 | 12,5  |
| 159 | 08.06.11 | 20.07.11 | 12,25 |
| 158 | 20.04.11 | 08.06.11 | 12    |
| 157 | 02.03.11 | 20.04.11 | 11,75 |
| 156 | 19.01.11 | 02.03.11 | 11,25 |
| 155 | 08.12.10 | 19.01.11 | 10,75 |
| 154 | 20.10.10 | 18.12.10 | 10,75 |
| 153 | 01.09.10 | 20.10.10 | 10,75 |
| 152 | 21.07.10 | 01.09.10 | 10,75 |
| 151 | 09.06.10 | 21.07.10 | 10,25 |
| 150 | 28.04.10 | 09.06.10 | 9,5   |
| 149 | 17.03.10 | 28.04.10 | 8,75  |
| 148 | 27.01.10 | 17.03.10 | 8,75  |
| 147 | 09.12.09 | 27.01.10 | 8,75  |
| 146 | 21.10.09 | 09.12.09 | 8,75  |
| 145 | 02.09.09 | 21.10.09 | 8,75  |
| 144 | 22.07.09 | 02.09.09 | 8,75  |
| 143 | 10.06.09 | 22.07.09 | 9,25  |
| 142 | 29.04.09 | 10.06.09 | 10,25 |
| 141 | 11.03.09 | 29.04.09 | 11,25 |
| 140 | 21.01.09 | 11.03.09 | 12,75 |
| 139 | 10.12.08 | 21.01.09 | 13,75 |
| 138 | 29.10.08 | 10.12.08 | 13,75 |
| 137 | 10.09.08 | 29.10.08 | 13,75 |
| 136 | 23.07.08 | 10.09.08 | 13    |

Fonte: (BACEN, 2017)  
<https://www.bcb.gov.br/Pec/Copom/Port/taxaSelic.asp>.

Disponível

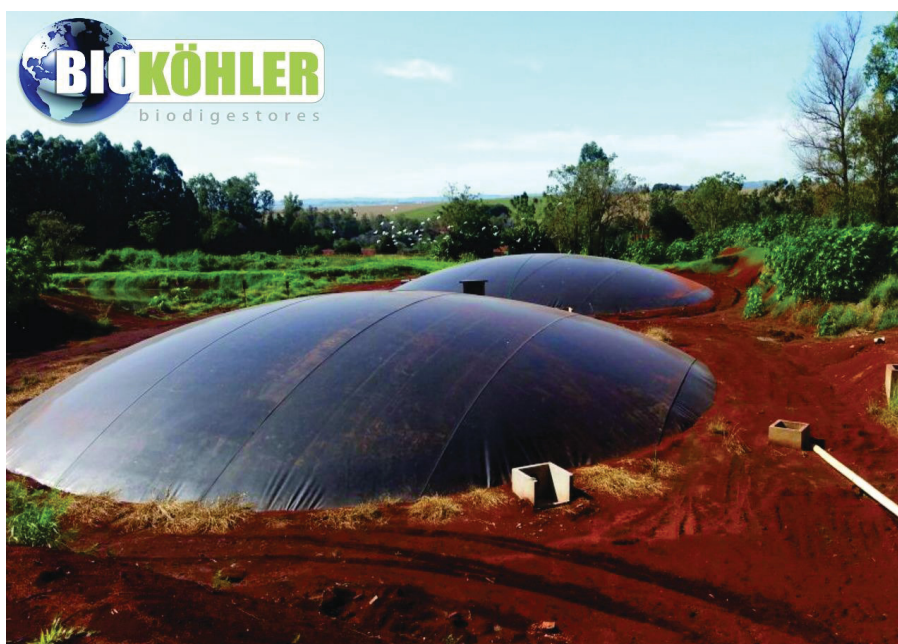
em:



## ANEXO 3 - FOTOS



Legenda: Agitador SUMA. Fonte: (BIOKÖHLER, 2017)



Legenda: Tanques de Fermentação. Fonte: (BIOKÖHLER, 2017)





Legenda: Construção Tanque de Fermentação. Fonte: (BIOKÖHLER, 2017)



Legenda: Cerâmica Stein. Fonte: (BIOKÖHLER, 2017)